

El Ecodiseño: un llamado a la conciencia en el uso de polímeros biodegradables y no biodegradables

Ecodesign: a call for awareness in the use of biodegradable and non-biodegradable polymers

Yina Ortega-Santiago^{a, c}, Sergio A Julio-Rivas^a,
José-Miguel Pinto- Gómez^b, Dagoberto Lozano-Rivera^a

RESUMEN

Actualmente en Colombia el estudio del impacto ambiental generado por el diseño y uso de bolsas se considera prioritario debido a la variabilidad de la dinámica ambiental de los componentes, ante la influencia generada por el calentamiento global; debiendo entonces hacer un seguimiento desde las materias primas hasta que el consumidor utilice el producto, y este se disponga, ya sea en rellenos sanitarios, en procesos de combustión o reciclaje. De allí que se genere este estudio, cuyo objetivo principal es analizar el ciclo de vida de dos productos similares, bolsas compuestas por polímeros biodegradables, como los polihidroxibutirato (PHB), y otras compuestas por polímeros no biodegradables, como el polietileno de alta densidad (HDPE). Se utiliza una metodología de análisis de inventario que tiene en cuenta las emisiones de CO₂ y el consumo energético, usando la tabla de materiales ASHBY. Los resultados muestran que la bolsa de PHB es menos contaminante en términos de emisiones de CO₂ y consumo energético, en comparación con la bolsa de HDPE, y que la diferencia de masa entre las dos bolsas tiene un impacto ambiental directo. Se concluye, por un lado, que la bolsa de HDPE es más perjudicial para el medio ambiente, y por otro, que el potencial de un ecodiseño en la materia permite promover el desarrollo sostenible de los envases; a la vez, se anima a los actores involucrados a la implantación de principios industriales convenientes para fomentar una mejor calidad de vida en los usuarios.

PALABRAS CLAVE: Ciclo de vida; contaminación industrial; desarrollo medio ambiental; ecodesarrollo; estrategia de desarrollo; calidad de vida

ABSTRACT

Currently in Colombia, the study of the environmental impact generated by the design and use of bags is considered a priority due to the variability in the environmental dynamics of the components, in the face of the influence generated by global warming; therefore, monitoring must be done from the raw materials until the consumer uses the product, and it is disposed of, either in sanitary landfills, in combustion or recycling processes. Hence this study, whose main objective is to analyze the life cycle of two similar products, bags made of biodegradable polymers, such as polyhydroxybutyrate (PHB), and others made of non-biodegradable polymers, such as high-density polyethylene (HDPE). An inventory analysis methodology is used that takes into account CO₂ emissions and energy consumption, using the ASHBY table of materials. The results show that the PHB bag is less polluting in terms of CO₂ emissions and energy consumption, compared to the HDPE bag, and that the difference in mass between the two bags has a direct environmental impact. It is concluded, on the one hand, that the HDPE bag is more detrimental to the environment, and on the other, that the potential of an eco-design in this matter allows promoting the sustainable development of packaging. At the same time, the actors involved are encouraged to implement suitable industrial principles to promote a better quality of life for users.

KEY WORDS: Life cycle; industrial pollution; environmental development; ecodesign; development strategy; quality of life

a Universidad Popular del Cesar seccional Aguachica, departamento de Ciencias Agroindustriales. Aguachica Cesar, Colombia ORCID: Ortega, YP: 0000-0003-2718-0374, Julio, SA: 0009-0001-3314-6706, Lozano, D: 0000-0003-1294-196X

b Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA Emprende Rural (SER). San Gil Santander, Colombia. ORCID: Pinto, JM: h0009-0009-4569-2358

c Autor de correspondencia: yp.ortega@uniandes.edu.co

Recepción: 11 de julio de 2023 Aceptación: 25 de diciembre de 2023

Introducción

La ingeniería agroindustrial se ha convertido en una herramienta fundamental para el mundo contemporáneo, por su contribución significativa a la generación de novedosas tecnologías agrícolas, y la promoción estratégica de medios para el abordaje de situaciones comunitarias de primera necesidad. No obstante, siempre permanece una carga negativa en el ecosistema por la trascendencia y el impacto producido por los materiales utilizados, prevaleciendo también el calentamiento global como un desafío del sector.

Con respecto a lo anterior hay diversas investigaciones, entre ellas, Orbegozo (2023) señala la necesidad de reducir la contaminación por plásticos porque genera daños a la salud y al medio ambiente. Y agrega que, en este sentido, los actores sociales promover actitudes ecológicas positivas, aumentando el conocimiento medioambiental por parte de todos. Resulta entonces relevante medir continuamente la relación entre el nivel de conocimiento y la postura ambiental de los sujetos frente a la contaminación derivada del uso de plásticos.

Asimismo, en el artículo *Estudio de prospectiva de ingeniería agroindustrial al 2035* (Zartha et al. 2021) los autores identifican variables presentes en el mundo como una prospectiva promisoría. De acuerdo con ese estudio ambiental, dichas variables tienen la capacidad de darse indefectiblemente, sugiriendo en tal sentido la priorización de nuevas tecnologías, de métodos modernos, asumiendo la responsabilidad de las emisiones de CO₂ generadas, y destacando el rol significativo de los actores; además del fomento de objetivos comunitarios. Se sugieren tribunas futuristas para la Ingeniería Agroindustrial desde ahora y hacia el año 2035 tanto para el manejo conveniente de materiales, como para la productividad estratégica, los cambios continuos y la comercialización adecuada de los productos generados.

De la misma manera, Maureira (2022) señala que la diversidad de plásticos generados en el mundo para distintos usos ha derivado consecuencias de contaminación ambiental, degradando diferentes ecosistemas, lo que se ha constituido en un problema general que debe ser atendido. Tal es el caso del uso de biopolímeros como sustitutos de los productos ya creados, y el caso del polihidroxibutirato (PHB)

el cual exige un foco de atención por sus propiedades análogas a los polímeros de mayor uso, pero con una inconsistencia mayor.

En este contexto, se presenta una herramienta clave para identificar y hacer una evaluación de los principales impactos ambientales que pueden ser producidos en el desarrollo de las etapas de vida de un producto. Se trata del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), tal como expresa Sastoque (2021), en el cual debe atenderse la extracción del material de origen, luego, el proceso de conversión aplicado a la materia prima, pasando por la producción, transporte y distribución, hasta su utilización. Además del mantenimiento en condiciones favorables y los procedimientos de reutilización, reciclado y disposición final. Desde esta perspectiva, a partir del ACV es posible comprender el panorama completo de los impactos ambientales involucrados, pudiendo ubicar, generar, crear alternativas más sostenibles en la pretendida productividad e implementar confiables criterios ambientales, basados en acciones y estrategias factibles.

De la misma manera, en el ámbito de la investigación se han llevado a cabo estudios relevantes sobre el inventario de análisis de ciclo de vida, como es el caso de Calero (2014), quien evaluó la producción de Polihidroxialcanoatos (PHAs) utilizando cultivos microbianos mixtos. Sus resultados coinciden con estudios similares de Leal (2005), de cuyos criterios derivan la necesidad de procesos productivos para la reducción de los impactos ambientales a partir de una adecuada elección de la materia prima y el uso de residuos de proceso y coproductos para la producción de energía. Igualmente, de los resultados de este proceso se ratifica que los valores de impacto del cambio climático suelen estar entre 1 y 6 kg de CO₂-eq. por kg de PHAs producidos, mientras que en la mayoría de los estudios el requerimiento de energía supera los 29 MJ por kg de biopolímero.

Asimismo, coinciden tales señalamientos con lo planteado por Rojas, Hoyos y Mosquera (2016) sobre la producción de Polihidroxialcanoatos (PHAs). En su investigación permiten aclarar que estos son poliésteres intracelulares sintetizados a través de diversas especies bacterianas y depende de una variedad de nutrientes para su metabolismo y desarrollo. Tal es el caso del oxígeno, nitrógeno y carbono, como

expresan Franco et al (2009), los cuales, siendo biodegradables, dependen de su composición química y estructural para ser empleados en aplicaciones parecidas a los polímeros, de allí que el atributo de ser biodegradables representa un costo más elevado en el mercado, comparado con los derivados del petróleo; pero lo más importante es que el uso de fuentes renovables fomenta colateralmente el aprovechamiento de los posibles subproductos agroindustriales para generar otros productos, lo cual se ubica como una novedosa alternativa ecológica en el mundo.

Otro estudio relevante es el caso de la industria petroquímica en Tailandia, donde se evaluó la producción de resina de polietileno de alta densidad (HDPE), como reportan analistas y expertos de Mordor Intelligence (2023). El estudio refiere registros relevantes sobre el mercado de plásticos y su procesamiento en esa localidad. De sus resultados es posible colegir el alto costo operativo de la producción de resina de HDPE, y que las formas de evaluación ambiental revelan el impacto mayor de la energía no renovable, seguida de los carcinógenos, inorgánicos respiratorios y el calentamiento global. Destacan que la incidencia social de este impacto se mide a partir de baremos y directrices del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Sociedad de Toxicología y Química Ambientales (SETAC) desde cuyas prácticas aluden a un rendimiento óptimo para la mayoría de los indicadores seleccionados.

Con relación a la temática general aquí planteada se destaca de los estudios previos el enfoque conocido como 'de la cuna a la tumba', el cual permite evaluar las etapas del ciclo de vida de las bolsas y considerar diferentes escenarios, como la disposición en vertederos, la combustión y el reciclaje. Al efecto, Salvador (2017) hace un recorrido sobre las fases de montaje de las bolsas y lo que llama los escenarios de fin de vida. Así, se determinan las categorías de mayor impacto, además de las causas de tales procesos o sustancias, y aduciendo que en la fabricación y montaje se aprecia el impacto en la extracción de materias primas, en la energía consumida y las emisiones de fabricación de tal proceso productivo.

De igual modo, se señala que en el fin de vida deben atenderse los impactos por la disposición

final de las bolsas, tomando en cuenta las emisiones que generan en los mencionados tratamientos de residuos: reciclaje, vertedero e incineración con recuperación de energía. Finalmente, se alude al ciclo de vida completo de la materia prima donde, en definitiva, se aprecia el impacto global de cada tipo de bolsa "de la cuna a la tumba" (p. 78)

Cabe destacar en este apartado que, al comprender y comparar los impactos ambientales de las bolsas de polímeros biodegradables y las tradicionales de HDPE, se podrá fomentar la adopción de alternativas más respetuosas con el medio ambiente y promover prácticas más sostenibles en la industria. Esto puede realizarse a partir del enfoque de evaluación integral en el campo agroindustrial, el cual se muestra como una metodología esencial para tomar decisiones informadas y desarrollar estrategias de diseño y producción más sostenibles.

Esta evaluación es una ponderación efectuada bajo el enfoque integral de los efectos producidos por las actividades de un proyecto. Para la recolección de datos, se evaluó si estos lograron alcanzar los objetivos planteados. Esta evaluación se realizó de manera sistemática y cuantificable, siguiendo la perspectiva compartida por Hillermann (2012). Se consideró la pertinencia y eficacia de los datos recolectados, además de evaluar la sostenibilidad de los resultados esperados.

Esta misma evaluación ayuda a constatar la información derivada del seguimiento del proceso, la cual arroja información en contra los resultados generados, atendiendo a los indicadores y línea base propuesta. Se puede, entonces, verificar la eficiencia estratégica para el uso y la determinación de recursos, la viabilidad, los responsables en la realización, y su colaboración al nivel de adecuación de los objetivos definidos al inicio del programa. Y, a la vez, permitiendo marcar la denominada ruta crítica y los aspectos que afectan el alcance deseado. Con ello, es posible diseñar propuestas de ajuste para solventar los obstáculos surgidos e implementar mejoras en etapas sucesivas.

Asimismo, al usar la información obtenida, se ejecuta de manera externa, lo que deriva en la construcción de conocimiento sobre los procesos. Cuando se alcanzan los resultados deseados, se validan los logros para medir los resultados, generando

recomendaciones, buenas prácticas y conocimiento. De este proceso evaluativo se destaca la necesidad de la validación de expertos, conformado por equipos multidisciplinarios, para producir objetividad en los datos, y en el progreso del saber y hacer.

Desde esta perspectiva, la evaluación se muestra como un control de calidad por excelencia en cualquier actividad producida en un proyecto y comporta cuatro elementos principales, para la etapa de diseño del producto, según señala Berumen (2010). A saber, coherencia y claridad en la lógica de intervención, definición del diseño con antelación mostrando propósitos y alcance, seguimiento factible a partir de métodos y procedimientos acordes al diseño planteado, debiendo surgir buenas prácticas y lecciones aprendidas para el futuro de su ejecución.

De allí que en el presente estudio se defina como objetivo analizar el ciclo de vida de dos productos similares, bolsas compuestas por polímeros biodegradables, como los polihidroxibutirato (PHB), y otras compuestas por polímeros no biodegradables, como el polietileno de alta densidad (HDPE), debiendo realizar la comparación entre los materiales basada en la implementación de criterios medioambientales en la fase de diseño y desarrollo del producto. El estudio considera el impacto ambiental generado por cada bolsa, desde su análisis lo largo de su ciclo de vida (ACV), es decir, desde las materias primas hasta su disposición final, ya sea en rellenos sanitarios, en procesos de combustión o reciclaje.

Además del ACV, se utiliza la rueda estratégica de ecodiseño como una herramienta de referencia para establecer la estrategia de diseño del producto y evitar posibles desviaciones en la ruta crítica trazada para ello. Esta rueda también permite visualizar el perfil ambiental actual del producto y definir estrategias a corto y largo plazo, fomentando así la creatividad orientada al ecodiseño.

Sobre el particular, expresamente, Valenzuela e Hincapié (2021) validan los llamados agroecosistemas (AES), refiriendo que, al implementarlos, se cumple con prácticas agroecológicas a partir de las condiciones propias a la obtención de un índice de sostenibilidad mayor al de los AES convencionales. Tales prácticas, con base en los productos que intervenga el uso agroindustrial, pueden favorecer “la siembra de policultivos, la maximización de la

diversidad genética, el compostaje, la elaboración de biopreparados y el autoabastecimiento de semillas” (p. 63). Lo cual favorece el autoconsumo, causando poca dependencia de insumos externos, y genera, así, sistemas agroindustriales más resilientes y una disminución de riesgos económicos.

Este ecodiseño, según Gutiérrez (2022), es establecido en una diversidad tipológica, a través de resoluciones emanadas del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia. Por ello, mediante una fase diagnóstica sobre los envases y empaques se seleccionan criterios de ecodiseño que permiten formular alternativas a los escenarios actuales, las cuales son evaluadas a través de herramientas informáticas y la aplicación de indicadores de rendimiento clave que indiquen la influencia en daño e impactos, buscando su disminución significativa con el uso de bolsas oxobiodegradables.

En el caso del presente estudio, se utiliza como estrategia de ecodiseño la Rueda de LiDS, similar a lo presentado por Ecolan (2023), donde expertos de Ingeniería y Consultoría Ambiental implementan varias prácticas para cumplir con los fines aspirados. Al efecto, se realiza la selección de materiales de bajo impacto, la reducción de la cantidad de material usado, la selección de técnicas de producción y de distribución ambientalmente eficientes. Y este proceso, a su vez, busca reducir el impacto ambiental en la fase de utilización, llevando a una optimización del ciclo de vida, del sistema de fin de vida, y optimizar la función, lo cual se convierte en nuevas ideas de producto para diversificar sus fines.

De igual manera, se considera la estrategia del Análisis de Inventario (ICV), que implica la medición precisa de fuentes y productos en términos de contaminantes. Este paso inicial constituye el punto de partida para evaluar los impactos de todo el sistema, como explica la Magíster en Ingeniería y Gestión Medioambiental, Esperanza Haya Leiva (2016), en su guía sobre Análisis de Ciclo de Vida. Esta metodología propone estrategias específicas para cada etapa del ciclo de vida de un producto, examinando las fases que podrían generar impactos negativos relevantes. Después, se clasifica el producto según los volúmenes de materia prima, la fabricación, transportación, uso y disposición.

En este sentido, el ecodiseño es capaz de innovar de manera radical los sistemas y los productos de una empresa, pudiendo promover soluciones más sencillas con resultados a corto plazo. La aplicación del ecodiseño puede darse por etapas: mejorando el producto, rediseñándolo, estableciendo un nuevo concepto o un nuevo sistema para fomentar su total innovación.

Así entonces, con el fin de comprender a fondo el impacto ambiental de cada tipo de bolsa, se realiza un análisis exhaustivo desde la etapa inicial de extracción de materias primas hasta su disposición final. Por un lado, se analiza el Polihidroxibutirato (PHB), un biopolímero sintetizado a partir de la fermentación de ciertos microorganismos que acumulan PHB como fuente de energía y carbono en situaciones extremas, como limitaciones de nutrientes y exceso de carbono. Por otro lado, se examinan las bolsas plásticas tradicionales elaboradas con HDPE, un polímero obtenido mediante la polimerización del etileno, el cual, a su vez, y tal como lo señalan Barboza y Rimapa (2017), se extrae del proceso de refinación del petróleo.

Para garantizar resultados significativos y comparables, se ha seleccionado como unidad funcional –definida como la cuantificación de las funciones del sistema–, el transporte o la movilidad manual de 5 kilos de mercancía. Esta elección permite establecer un marco claro para la evaluación y facilita la comparación entre los dos tipos de bolsas. Así lo expresa Salvador (2017), quien afirma que la necesidad de esta unidad funcional es que en los estudios realizados bajo la metodología de Análisis de ciclos de vida (ACV) de productos lo relevante no es tal producto en físico, sino su función, lo que a su vez permite cuantificarla, pero no comparando los productos directamente, sino utilizando el servicio que prestan como base de comparación.

De la misma manera, el análisis integral del impacto ambiental considera una amplia gama de factores, como el consumo de recursos naturales, las emisiones de gases de efecto invernadero, la generación de residuos y otros impactos asociados. De esta manera, se podrá obtener una visión completa y detallada de las consecuencias ambientales de cada tipo de bolsa a lo largo de su ciclo de vida.

Con base en lo expuesto, se evidencia que, en el campo de la agroindustria, el estudio de las bolsas de polímeros biodegradables y las tradicionales elaboradas con HDPE adquiere una relevancia significativa por la cual resulta importante desarrollar una planificación estratégica al momento de realizar una comparación exhaustiva entre los tipos de bolsas seleccionadas, pudiendo con ello elaborar un ecodiseño adecuado a la temática.

Entonces, este estudio es relevante tanto en el ámbito académico como en el profesional, ya que proporciona información valiosa para la toma de decisiones en el diseño y producción de productos más sostenibles. Así lo sostienen Valero, Ortégón y Uzcátegui (2019), quienes afirman que los biopolímeros basados en recursos renovables y/o biodegradables han derivado creciente interés en la industria de los plásticos a tal punto que se han producido avances y un gran desarrollo en el estudio de los polímeros basados en recursos renovables, polímeros biodegradables y biopolímeros sintetizados por microorganismos (polihidroxialcanoatos [PHA]).

Materiales y Métodos

El desarrollo metodológico de la investigación está relacionado con el análisis del ciclo de vida de dos productos similares. Por un lado, las bolsas compuestas por polímeros biodegradables, como los polihidroxibutirato (PHB); por otro lado, aquellas compuestas por polímeros no biodegradables, como el polietileno de alta densidad (HDPE). El desarrollo metodológico estuvo basado en el modelo analítico descriptivo de Gartner, como expresa Omedes (2017), utilizado como una etapa preliminar del procesamiento de datos con la finalidad de crear datos históricos, buscando información útil para un análisis posterior.

Esto dio paso a una planificación estratégica para contemplar la comparación de los dos tipos de bolsas, haciendo uso de un análisis de inventarios que permitió cuantificar las emisiones de dióxido de carbono y los mega julios eléctricos involucrados desde la extracción de las materias primas hasta la disposición final de ambos materiales. Ambos tipos de bolsas se producen utilizando el mismo principio

industrial, a través de un proceso de extrusión seguido de tintado y corte.

Para simular la etapa de transporte, se consideran las entregas de materias primas por parte de Inversiones Romeplast, S.A.S. y la empresa Bio-Bag, ubicadas en Colombia, teniendo en cuenta las distancias y los porcentajes de transporte interno asociados a cada tipo de bolsa. En cuanto al uso de las bolsas, el número de veces que se reutilizan es determinado por los analizadores del ACV. Con relación a la disposición final, se contempla la combustión del 100% de las bolsas HDPE y la descomposición de las bolsas PHB.

Resultados

Los resultados del presente estudio se evidencian a partir de los siguientes procedimientos y consecuente logro de los siguientes datos:

Análisis de inventario

Bajos los estatus propuestos por la ISO 14041-1998 se establece el análisis de inventarios como un

elemento crucial en la conformación del análisis de ciclo de vida (ACV), ya que este realiza una recolección de datos. Estos datos son procesados con la finalidad de estimar una cuantificación general de los márgenes contaminantes asociados a un producto. Resultó imprescindible determinar el comportamiento que enmarca cada producto en función de su composición; por ello, las tablas 1 y 2 contemplan los parámetros requeridos para la determinación del margen conveniente asociado a cada etapa a lo largo de su ciclo de vida de las bolsas plásticas.

De la misma manera, para la determinación del margen contaminante se estableció una valoración por etapas, de tal manera que permitiera evidenciar la influencia con mayor participación de la bolsa plástica. Para ello, se hizo uso de las ecuaciones contempladas en la tabla 3.

Asimismo, la cuantificación realizada ha consistido en evaluar cada etapa del producto individual. De tal manera que, el sumatorio total representada por la suma del margen contaminante de cada etapa, refleja la contribución ejercida de CO₂ y Mje- en todo el ciclo de vida de las bolsas plásticas.

Tabla 1. Parámetros asociados a las bolsas biodegradables-PHB

DATOS GENERALES-PHB		
Descripción	valor	Unidades
# Usos	1	Adimensional
Distancia recorrida (Transporte materias primas)	347,7	Km
Peso de la bolsa	2,0869E-08	Kg
Peso de PHB	2,0869E-08	Kg
base de cálculo PHB	2,09, E-08	Kg
factor camión de 32 toneladas co2	0,067	Kg CO ₂ /Ton.m. Km
base de cálculo (peso transporte)	2,087, E-08	Kg
factor camión de 32 toneladas MJe-	0,94	MJ/Ton.m. Km
tonelada métrica	1, E+03	Kg
distancia recorrida (transporte interno)	18,3	Km
factor camión de carga liviana toneladas co2	0,18	Kg CO ₂ /Ton.m. Km
factor camión de carga liviana toneladas Mje-	2,5	MJ/Ton.m. Km

Nota. Fuente: Ashby (2014)

Tabla 2. Parámetros asociados a las bolsas no biodegradables HDPE

DATOS GENERALES HDPE		
Descripción	valor	Unidades
# Usos	1	Adimensional
Distancia recorrida (Transporte de materiales)	542,8	Km
Peso de la bolsa	0,969	Kg
Peso de HDPE	9,69, E-01	Kg
base de HDPE	9,69, E-01	Kg
Descripción	valor	Unidades
factor camión de 32 toneladas CO ₂	0,067	Kg CO ₂ / Ton.m. Km
base de cálculo (peso transporte)	9,690, E-01	
factor camión de 32 toneladas MJe-tonelada métrica	0,94	MJ/Ton.m. Km
distancia recorrida (transporte interno)	47,2	Km
factor camión de carga liviana toneladas CO ₂	0,18	Kg CO ₂ / Ton.m. Km
factor camión de carga liviana toneladas MJe-	2,5	MJ/Ton.m. Km

Nota. Fuente: Ashby (2014)

Tabla 3. Fórmulas que determinan el margen de generación de CO₂ o Mje, en función de la etapa que le precede a la bolsa plástica

Etapa	KgCO ₂	Mje-
Materias Primas	$\frac{\text{Peso en kg}}{\#Usos} \times \text{Factor promedio}$	$\frac{\text{Peso en kg}}{\#Usos} \times \text{Factor promedio} \times 0,27$
Procesamiento	$\frac{\text{Peso en kg}}{\#Usos} \times \text{Factor promedio}$	$\frac{\text{Peso en kg}}{\#Usos} \times \text{Factor promedio} \times 0,27$
Uso	Tiempo de uso* Potencia* Área ocupada *1,36	
Transporte	$\frac{\text{Peso en kg}}{\#Usos} \times \frac{\text{Factor CO}_2}{1000} \times \text{Km}$	$\frac{\text{Peso en kg}}{\#Usos} \times \frac{\text{Factor CO}_2}{1000} \times \text{Km} \times 0,27$
Fin de vida	$\left(\frac{\text{Peso en kg}}{\#Usos}\right) \times \% \text{ reciclaje} \times \text{Factor promedio}$	$\left(\frac{\text{Peso en kg}}{\#Usos}\right) \times \% \text{ reciclaje} \times \text{Factor promedio} \times 0,27$

Nota. Fuente: Autores (2023)

Cuantificación de CO₂ y Mje- de las bolsas PHB y HDPE

Bolsas PHB

Con ayuda de las tablas de ASHBY se estableció el factor de CO₂ y factor de MJ del material asociada a cada etapa, 4.35 y 85.5 para materias primas, 0.455 y 6.1, para procesamiento, además 0.067 y 0.94 para el transporte de las materias primas, 0.18 y 0.18 para

el recorrido de las materias primas respectivamente, es decir, al interior de empresa procesadora.

Materias primas

$$\text{Kg CO}_2 = \frac{2,0869\text{E-}08}{1} \times 4,35 = 9,08, \text{E-}08$$

$$\text{Mje-} = \frac{2,0869\text{E-}08}{1} \times 85,5 \times 0,27 = 4,82, \text{E-}07$$

Procesamiento

$$\text{Kg CO}_2 = \frac{2,0869\text{E-}08}{1} \times 0,455 = 9,50, \text{E-}09$$

$$\text{Mje-} = \frac{2,0869\text{E-}08}{1} \times 6,1 \times 0,27 = 3,44, \text{E-}08$$

Transporte (recorrido materias primas)

$$\text{Kg CO}_2 = \frac{2,0869\text{E-}08}{1} \times \frac{0,067}{1000} \times 347,7 = 5, \text{E-}10$$

$$\text{Mje-} = \frac{2,0869\text{E-}08}{1} \times \frac{0,94}{1000} \times 347,7 \times 0,27 = 6, \text{E-}03$$

Transporte (recorrido interno)

$$\text{Kg CO}_2 = \frac{2,0869\text{E-}08}{1} \times \frac{0,18}{1000} \times 18,3 = 7, \text{E-}11$$

$$\text{Mje-} = \frac{2,0869\text{E-}08}{1} \times \frac{0,18}{1000} \times 183 \times 0,27 = 2, \text{E-}04$$

Bolsas HDPE

Con ayuda de las tablas de ASHBY, se estableció el factor de CO₂ y factor de MJ del material asociada a cada etapa, 2.75 y 31 para materias primas, 0,47 y 6,3, para procesamiento, además 0,067 y 0,94 para el transporte de las materias primas, 0,18 y 0,18 para el recorrido de las materias primas respectivamente; es decir, al interior de la empresa procesadora, en este caso, el material es enviado a combustión, por lo cual se le asocia un factor de CO₂ de 2,85 y unos MJ de 45.

Materias primas

$$\text{Kg CO}_2 = \frac{9,69, \text{E-}01}{1} \times 2,75 = 2,66, \text{E+}00$$

$$\text{Mje-} = \frac{9,69, \text{E-}01}{1} \times 31 \times 0,27 = 8,11, \text{E+}00$$

Procesamiento

$$\text{Kg CO}_2 = \frac{9,69, \text{E-}01}{1} \times 0,47 = 4,55, \text{E-}01$$

$$\text{Mje-} = \frac{9,69, \text{E-}01}{1} \times 6,3 \times 0,27 = 1,65, \text{E+}00$$

Transporte (recorrido materias primas)

$$\text{Kg CO}_2 = \frac{9,69, \text{E-}01}{1} \times \frac{0,18}{1000} \times 542,8 = 4 \text{ E, -}02$$

$$\text{Mje-} = \frac{9,69, \text{E-}01}{1} \times \frac{0,18}{1000} \times 542,8 \times 0,27 = 1,335, \text{E-}01$$

Transporte (recorrido interno)

$$\text{Kg CO}_2 = \frac{9,69, \text{E-}01}{1} \times \frac{0,18}{1000} \times 47,2 = 8, \text{E-}03$$

$$\text{Mje-} = \frac{9,69, \text{E-}01}{1} \times \frac{0,18}{1000} \times 47,2 \times 0,27 = 3,087, \text{E-}02$$

Fin de vida (Combustión)

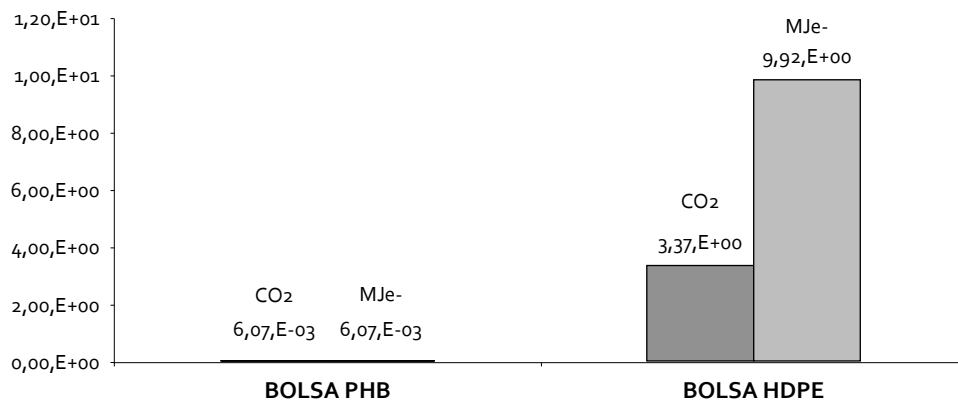
$$\text{Kg CO}_2 = \frac{9,69, \text{E-}01}{1} \times 100\% \times 2,85 = 2,76, \text{E+}00$$

$$\text{Mje-} = \frac{9,69, \text{E-}01}{1} \times 100\% \times 45 \times 0,27 = 2,54, \text{E-}01$$

Destaca de los resultados que, al visualizar la Gráfica 1, es posible evidenciar el comportamiento de los polímeros que componen a cada bolsa, donde se enfatiza el inminente comportamiento del HDPE. La bolsa constituida por PH(B) presenta un margen contaminante menor, tanto en generación de emisiones de CO₂ y consumo energético, siendo posible constatar dicho comportamiento. Al calcular las masas de las bolsas de HDPE y PH(B), se notó una gran disparidad, lo que impactó directamente en el comportamiento ambiental. La bolsa HDPE mostró emisiones de CO₂ y consumo energético mucho más altos. Al evaluar estos resultados con el análisis de inventario en la rueda ecológica del Ecodiseño, se recomienda a la industria favorecer la fabricación de bolsas biodegradables.

En este sentido, y tal como se puede evidenciar en el gráfico anterior, el resultado más relevante es el elevado consumo de MJe- por parte de la bolsa de polietileno de alta densidad, y que debido al factor de conversión es interpretada al final en CO₂. De la misma manera, se observa la directa confrontación entre la bolsa de polihidroxibutirato y polietileno de alta densidad, destacándose el polihidroxibutirato como el más beneficioso y sustentable para el

Gráfica 1. Tendencia del margen contaminante de dos tipos de bolsas plásticas: biodegradable y no biodegradable



Nota. Fuente: Autores (2023)

medio ambiente. Esto se debe a las bajas emisiones que hay detrás de todo su proceso de fabricación y transporte.

De igual manera, el PHB tiene potencial para reemplazar los polímeros más utilizados ya que cuenta con características semejantes y una degradabilidad mucho mejor, en contraposición con la bolsa elaborada con polietileno de alta densidad que compromete procesos de fabricación más complejos, como es el caso de la refinación del petróleo que es uno de sus procesos iniciales. Asimilando los resultados anteriores obtenidos en MJe- en la producción de ambas bolsas, prevalece una diferencia porcentual de más de 199%, lo que significa una variación desproporcionada.

En definitiva, para reducir la contaminación ambiental ocasionada por dichas materias primas, lo más sensato hoy en día es implementar nuevos materiales biodegradables y amigables con el medio ambiente, asimismo investigar y explorar nuevas materias primas que a largo plazo sirvan como un factor medioambiental beneficioso, mitigando el impacto ambiental y regulando las emisiones de CO₂.

Análisis bajo la visualización de la rueda estratégica del ecodiseño

En la Figura 1 se observa la representación de una bolsa plástica, denotada con base en el diseño y constituida por polímeros biodegradables (PHB), en la cual se enfatiza una comparativa con una bolsa

plástica no biodegradable (HDPE). La comparación se fundamenta en un análisis en el que se consideran diversas estrategias que han de contribuir a mejorar el perfil medioambiental del producto.

Ahora bien, para consolidar la construcción de la rueda estratégica del ecodiseño se debe establecer cuál es el grado de impacto ambiental al que está asociada cada etapa del producto. Así, con base en la estrategia asegurada en la rueda, una vez establecido el impacto ambiental, se procedió a establecer cada impacto asociado a cada estrategia. Así, al finalizar la evaluación de cada impacto, se reflejó un área que estipula el impacto medioambiental del producto. Y de esto se deriva que, entre más pequeña sea el área delimitada, mayor será el impacto ambiental del producto y viceversa. En igual sentido, entre mayor sea el área delimitada, menor será el impacto medioambiental asociado al producto. En relación con lo anterior, el objetivo buscado es aumentar la puntuación asociada a cada etapa del ciclo de vida, atribuida en cada una de las estrategias o ejes de la rueda estratégica de ecodiseño.

Discusión

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, es posible evidenciar que el análisis del ciclo de vida de un producto permite identificar los principales impactos ambientales –tal como se hizo en este estudio, si se aprecian sus fases o etapas, y partiendo del origen del producto hasta el final de

Figura 1. Rueda estratégica del ecodiseño



Nota. Fuente: Adaptado de The LiDS Wheel (Brezet and Van Hemel, 1997)

su vida útil—. Esto corrobora los planteamientos de Sastoque (2021). De allí que pueda colegirse que, identificados los principales impactos a lo largo del ciclo de vida de las bolsas en estudio, es posible derivar otras alternativas acerca de otros procesos productivos y la implementación de criterios ambientales cónsonos con el cuidado del ambiente.

De igual manera, a partir de los resultados es posible evidenciar, en cuanto a las materias primas, que las bio-bolsas están hechas a partir de PHB y la bolsa plástica tradicional está hecha a partir de HDPE. En cuanto a la producción, tanto las bio-bolsas como aquellas derivadas del petróleo se producen bajo un mismo principio, que además resulta rector de la industria. Es así que los polímeros con los que se fabrican ambas bolsas presentan características similares. El proceso efectuado consta de un proceso de extrusión, donde se introduce el polímero a una máquina extrusora hasta fundirse; en seguida, salen del aparato en forma de un globo plástico, el cual se somete a una temperatura baja. Luego, el material es introducido a una máquina rotativa flexográfica,

proceso en el cual se tiñe el plástico. Posteriormente se lleva a cabo el corte, y es aquí donde se da la forma que se desee a la bolsa.

En cuanto al transporte, al territorio de Aguachica, Cesar, ingresan las materias primas correspondientes a las bolsas de polietileno producidas por Inversiones Romeplast S.A.S., empresa cuyas actividades incluyen: fabricación y distribución de materias primas para bolsas plásticas de uso en el hogar, para empresas y negocios. La compañía tiene más de treinta y un años de trayectoria en el rubro (desde 1991), y posee una planta de producción que cuenta con la capacidad para clasificar, paletizar y re-procesar los desperdicios generados en cada uno de sus procesos, es decir, extrusión, sellado e impresión.

Con relación al uso, las bolsas plásticas de ambos materiales son utilizadas solamente una vez, contradiciendo su uso adecuado, que puede ser extendido a cuatro (4) veces. En cuanto al fin de vida, la disposición final que se le da a las bolsas, luego de completar su servicio, está dado por el transporte de mercancía desde un punto inicial hasta otro final:

de combustión del 100% para la bolsa de HDPE, y de descomposición para la bolsa de PHB. De este modo, ambas completan su servicio y ciclo final.

Finalmente, la rueda estratégica de ecodiseño, producto de este estudio, tiene múltiples aplicaciones y puede integrarse en distintas etapas del proceso de diseño. Esta herramienta sirve como referencia estratégica, pero requiere una lógica clara para su implementación efectiva, tal como indica Gutiérrez (2022). En línea con su enfoque, la rueda de ecodiseño se posiciona como una herramienta para visualizar el perfil ambiental actual de un producto. Sirve para señalar qué estrategias deben priorizarse tanto a corto como a largo plazo en el diseño y desarrollo de productos y procesos. Esta metodología facilita la creación de un plan de acción que orienta a todos los miembros del equipo de desarrollo hacia los aspectos clave para obtener un ciclo de vida óptimo en los productos a producir.

Conclusiones

Al visualizar el comportamiento de los polímeros en ambos productos y considerar el impacto derivado del calentamiento global, se puede concluir que la bolsa hecha con PHB es menos contaminante en términos de emisiones de CO₂ y consumo energético, medido en MJe. Esto se evidencia al calcular las masas de ambas bolsas, donde la diferencia considerable influye en el alto volumen de emisiones de CO₂ y consumo energético de la bolsa HDPE en comparación con la bolsa de PHB.

De igual manera, se concluye que, si se toma el diagrama correspondiente al ecodiseño como referente informativo, es posible incentivar el uso de las bolsas biodegradables. A su vez, esto deja claro que los actores significantes en el marco de estos procesos deben entonces inducir el uso de principios industriales que sean acordes al cuidado del ambiente para impulsar el desarrollo de una mejor calidad de vida.

Contribuciones de autoría

Yina Paola Ortega Santiago: contribuyó en la propuesta de investigación al identificar el tema del estudio, que se centra en comparar el ciclo de vida

de dos productos similares con comportamientos ambientales diferentes. Participó en la definición de los objetivos principales del estudio, que incluyen analizar el impacto ambiental de las bolsas de polímeros biodegradables y no biodegradables y promover el ecodiseño como una estrategia para el desarrollo sostenible de los envases. Además, Yina Paola Ortega Santiago fue responsable de la redacción y aprobación del manuscrito, asegurándose de que esté claro y coherente en su contenido.

Sergio Andrés Julio Rivas: tuvo un papel importante en la puesta en marcha de la investigación. Contribuyó en la definición de la metodología de análisis de inventario utilizada para evaluar el impacto ambiental de las bolsas. Participó en la recopilación de datos y en el análisis de las emisiones de CO₂ y el consumo energético asociados con cada tipo de bolsa a lo largo de su ciclo de vida.

José Miguel Pinto Gómez: desempeñó un papel clave en la realización de las metodologías utilizadas en la investigación. Contribuyó en la selección y aplicación de la tabla de materiales ASHBY para el análisis de inventario. Participó en la definición de la unidad funcional y en la identificación de los criterios medioambientales considerados en el estudio. Por otra parte, José Miguel Pinto Gómez colaboró en el análisis de los resultados y en la redacción del manuscrito, proporcionando explicaciones claras sobre los métodos utilizados y los hallazgos obtenidos.

Dagoberto Lozano Rivera: Colaboró en la interpretación de los resultados obtenidos y en la redacción del manuscrito, proporcionando información técnica precisa y relevante.

Conflictos de interés

No se presentan conflictos de intereses en la divulgación de los resultados obtenidos.

Referencias bibliográficas

- Ashby M. y Johnson K. (2014). Material profiles. Materials and Design (3ra Edición), pp.1-5. <https://educate.elsevier.com/book/details/9780080982052>. ISSN 9780080982052. En <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098205-2.00019-6>
- Barboza E., D.D. y Rimapa L., B. (2017). Proyecto de pre-factibilidad de instalación de una planta de producción

- de polietileno a partir de etileno. <https://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12893/1419/BC-TES-TMP-254.pdf>
- Berumen M., J. (2010). Monitoreo y evaluación de proyectos. En *Guía para la formulación de proyectos de inversión del sector agropecuario bajo el enfoque de planificación estratégica y gestión por resultados*. <https://www.fao.org/3/I8097ES/i8097es.pdf>
- Brezet H, Van Hemel C (1997) Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption. UNEP, Paris
- Calero, R. (2014). Obtención de polihidroxialcanoatos (PHA) a partir de cultivos mixtos microbianos usando efluentes ricos en ácidos grasos volátiles como sustrato. https://www.researchgate.net/publication/347135949_Obtencion_de_polihidroxialcanoatos_PHA_a_partir_de_cultivos_mixtos_microbianos_usando_efluentes_ricos_en_acidos_grasos_volatiles_como_sustrato
- Ingeniería y consultoría ambiental [EcoLan] (2023). Ecodiseño - diseño ecológico. <https://www.ecolaningenieria.com/es/ingenieria-ambiental/ecodiseño.html>
- Franco, M., Gómez, D., Castro, N., & Rendón, M. (2009). Polihidroxialcanoatos en actinomicetos nativos de suelos colombianos Polyhydroxyalkanoate of Actinomycetes native from Colombian soils. In *Polihidroxialcanoatos en actinomicetos nativos Rev. peru. biol* (Vol. 16, Issue 1). <http://www.scielo.org.pe/pdf/rpb/v16n1/a15v16n1>
- Gutiérrez R., L. M. (2022). Ecodiseño de envases y empaques como estrategia para la disminución de impactos ambientales negativos. *Revista Ingenio 5* (2), 56-68. <https://doi.org/10.29166/ingenio.v5i2.4245>
- Haya, E. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida*. <http://www.eoi.es>
- Hillermann, W. (2012). Módulo 4: Métodos de Planificación, Monitoreo y Evaluación de Proyectos de Desarrollo Social. Diplomado de Gestión de Proyectos. Editorial Entremundos. Guatemala.
- Leal, J. (2005). Ecoeficiencia: marco de análisis, indicadores y experiencias. Chile, Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas (CEPAL). División de Desarrollo sostenible y asentamientos humanos. Disponible en https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5644/S057520_es.pdf
- Maureira U., J. (2022). Preparación y caracterización de nanocompuestos de polihidroxibutirato con disulfuro de molibdeno para potenciales aplicaciones en packaging activo. [Tesis]. Universidad Santiago de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188061>
- Mordor Intelligence (2023). Mercado de plásticos en Tailandia: crecimientos, tendencias, impacto de Covid y pronósticos (2023-2028). <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/thailand-plastics-market>
- Omedes, J. (2017). Madurez analítica. Modelo de Gartner. <https://www.iadlearning.com/es/analitica-de-aprendizaje-madurez/#:~:text=EI%20modelo%20de%20Gartner%20define,de%20los%20an%C3%A1lisis%20matem%C3%A1ticos%20requeridos>
- Orbegozo Pinedo, L. J. (2023). El conocimiento y su relación en la actitud ecológica frente a la contaminación por plásticos en estudiantes de nivel secundaria en el distrito de San Martín de Porres, Lima, Perú 2021. Universidad Nacional del Callao. <http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/7539/TE-SIS-ORBEGOZO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rojas F., E.; Hoyos C., J. L. y Mosquera S., S. A. (2016). Producción de Polihidroxialcanoatos (Phas) a partir de *Ralstonia Eutropha* en un medio con harina de yuca como fuente de carbono. *Revista Bio Agro* [online]. 2016, vol.14, n.1, pp.19-26.
- Sastoque C., M. (2021). ¿Qué es el análisis del ciclo de vida?. *Revista Virtual Pro*. <https://www.virtualpro.co/noticias/-que-es-el-analisis-de-ciclo-de-vida->
- Soledad G., S. (2017). Huella ambiental de tres tipos de bolsa de la compra. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, España. https://oa.upm.es/47353/1/TFG_Soledad_Salvador_Garcia_Galan.pdf
- Valenzuela V., C. e Hincapié L., C. A. (26 al 29 de octubre de 2021). Evaluación de la sostenibilidad de agroecosistemas en el Municipio de Envigado, Colombia en el período 2018-2019. [Memorias del VII Congreso Internacional de Ingeniería Agroindustrial “Agroindustria y Sostenibilidad”]
- Valero V., Manuel F., Ortegón F., Maldonado ,Y., Maldonado, U. y Lisney, Y. (2013) Biopolímeros: avances y perspectivas. (Vol. 80 núm. 181), pp. 171-180. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/33557?show=full>
- Zartha S., J. W., Palacio P., J. C., Orozco M., G. L., Hincapié L., C. A., Ríos M., A. F., y Álvarez L., C. (26 al 29 de octubre de 2021). Estudio de prospectiva de ingeniería agroindustrial al 2035. Aplicación de la metodología de escenarios y el método Delphi [Memorias del VII Congreso Internacional de Ingeniería Agroindustrial “Agroindustria y Sostenibilidad”]