



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

INFLUENCIA DE LA MANUFACTURA EN EL CICLO DE VIDA DE LAS BOLSAS
PLÁSTICAS EN CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL MECÁNICA

CONSTANZA FRANCISCA HERNÁNDEZ CERDA

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO JORQUERA ENCINA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RUBÉN FERNANDEZ URRUTIA
DAVID CARRASCO MANRÍQUEZ

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA
POR: CONSTANZA FRANCISCA HERNÁNDEZ CERDA
FECHA: 06/07/2020
PROF. GUÍA: PATRICIO JORQUERA ENCINA

INFLUENCIA DE LA MANUFACTURA EN EL CICLO DE VIDA DE LAS BOLSAS PLÁSTICAS EN CHILE

El objetivo de este estudio corresponde a analizar el ciclo de vida de 5 tipos de bolsas plásticas en Chile: polietileno de alta densidad, polietileno de alta densidad con aditivos oxodegradables, polietileno de baja densidad, compostable y de polipropileno no tejido. Además de analizar cómo influyen diversos métodos de manufactura y uso de las bolsas en el impacto ambiental.

Para esto, se utilizó el software libre OpenLCA, junto con la base de datos Ecoinvent v3. Se consideraron 4 etapas en la fabricación de las bolsas: producción del pellet fuera de Chile, transporte del pellet a Santiago, producción de las bolsas y desecho en vertederos. Los indicadores ambientales a cuantificar corresponden a la Ecotoxicidad marina, Agotamiento de recursos fósiles y el Índice de cambio climático GWP100 (ICC).

El estudio demuestra que la bolsa de PP es la más perjudicial de todas, seguido de la bolsa de PEBD, mientras que la de PEAD es la menos contaminante. Se concluye también que la etapa de producción de las bolsas es aquella que más contribuye a los impactos ambientales, con dos excepciones: en el caso de la bolsa de PP, se produce un mayor agotamiento de recursos fósiles en la producción de pellet y una mayor cantidad de CO₂ equivalente en el transporte de pellet.

Luego, se realizó un análisis de sensibilidad que contempla 3 escenarios: utilización de una extrusora doble tornillo; bolsas de PEAD con pellet 100 % reciclado; y reutilizar las bolsas de PEBD 3 veces y las de PP 10 veces.

En el primer caso, al utilizar una extrusora doble tornillo se incurre en más gasto energético durante el proceso de fabricación de las bolsas, por lo que, se obtienen efectos más negativos. En el caso de utilizar pellet de PEAD 100 % reciclado, se obtuvo un efecto negativo en la ecotoxicidad marina, donde aumenta en un 15 %; por otro lado, el agotamiento de recursos fósiles se reduce en un 26 % y el ICC en un 7 %. Finalmente, en el tercer caso, se determinó que reutilizar 10 veces las bolsas de PP logran que sea aquella con menor impacto en el ACV, disminuyendo los indicadores en más de un 84 %. Mientras que si se reutilizan 3 veces las bolsas de PEBD, sus impactos disminuyen en un 66 %.

Además del ACV, se calculó un potencial de desperdicios que toma en cuenta la flotabilidad, precio, dimensiones y tasa de degradación de las bolsas. Como conclusión las bolsas PEAD obtuvieron un mayor riesgo, donde se establece que por cada 1000 bolsas de PEAD se encontrarán menos de 3 bolsas de PP en el mar, en el caso de reutilización, y 25 de PEBD.

Como trabajo futuro se sugiere realizar este estudio incorporando las bolsas de papel y de algodón, así como expandir la base de datos para incluir bolsas de PEBD y PP reciclado.

*So thanks
For believing in someone like me
For dealing with these tears and wounds
So thanks
For becoming my light
For becoming the flower
in the most beautiful moment in life*

Agradecimientos

En primer lugar a los profesores Patricio Jorquera, Ruben Fernández y David Carrasco, por aceptar ser parte de la comisión, por guiarme y confiar en mi trabajo. También al profesor Felipe Díaz Alvarado y a ProSUS por brindarme la base de datos necesaria para realizar este estudio.

A mi familia. A Osvaldo y Verónica, por apoyarme y darme alas en todos los desafíos que he querido tener. A Catalina y Victoria, por ser mi más grande orgullo. A mi Nina, mi Tata y mi abuelita Sonia, por darme el cariño que solo los abuelos pueden darte. A mis tías Irene y Graciela, porque nunca dudaron de mis habilidades y me quisieron como a una hija. A los Cerda y a los Hernández, por tantas palabras de aliento. Mención honrosa a Harry, Luna y Bruno por darme tanto amor incondicional.

A los amigos de la vida. A Marcela y Marcelo, mis amigos incondicionales, para que este año nos titulemos y la vida nos traiga solo felicidad. A mi querida Mafia: Yussara, M. Alejandra, Giselle, Paula, Nicole, Loreto, Johana y Geissy, por crear un círculo seguro, afectivo y duradero. Al team Sao Paulo: Fernanda, Yubitza, Catalina y Elizabeth, por uno de los mejores viajes de mi vida y por ser una alegría constante el año que pasó.

A los amigos de la universidad. A Makarena y Mackarena, sin ustedes habría estado acá quién sabe cuántos años más, gracias por tanto y perdón por tan poco. A los amigos de primer año: Connie, Javiera, Camila, Guillermo, Javier, Luis y Marcos por acompañarme todos estos años y darme ánimos cuando ya no daba más. A la gente del DIMEC: Martín, Valentina, Felipe, Rodrigo, Maria Eugenia, Claudia, los de la salita del 4to y la de memoristas por alojarme y hacerme parte de esta comunidad tan bella.

Special thanks to my friends from abroad: Mandy, Alicia, Luchelle and Teresa, for making my stay in Korea a beautiful and treasured memory.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Generales Básicos	1
1.1.1. Análisis de Ciclo de Vida	1
1.1.2. Bolsas plásticas y su impacto ambiental	2
1.2. Motivación	4
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos	5
2. Antecedentes Específicos	6
2.1. Polímeros	6
2.2. Polietileno de alta densidad	7
2.3. Materiales oxodegradables	8
2.4. Polietileno de baja densidad	8
2.5. Tejido no tejido	9
2.6. Materiales compostables	10
2.7. Manufactura de las bolsas	11
2.8. Categorías de Impacto Ambiental	14
2.9. Potencial de Desperdicios	15
2.10. Revisión Bibliográfica	17
3. Metodología	21
3.1. Definición de los objetivos y alcances	21
3.1.1. Objetivos del estudio	21
3.1.2. Alcances del estudio	21
3.2. Inventario del ciclo de vida	23
3.2.1. Recopilación de datos	23
3.2.2. Cálculo de datos	27
3.3. Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida (EICV)	29
4. Resultados y Análisis	30
4.1. Resultados del EICV	30
4.1.1. Resultados generales	30
4.1.2. Resultados por etapa	33
4.2. Análisis de sensibilidad	41

4.2.1. Caso 1: Extrusora doble tornillo	42
4.2.2. Caso 2: Pellet de PEAD 100 % reciclado	46
4.2.3. Caso 3: Bolsas reutilizables	54
4.2.4. Potencial de desperdicios	62
4.3. Discusiones finales	64
5. Conclusiones	66
Nomenclatura	69
Bibliografía	71
A. Energía consumida para fabricar las bolsas	75
B. Datos del ACV para el caso 3	77

Índice de Tablas

2.1. Tipos de bolsas analizadas en el LCA elaborado por Environment Agency en el Reino Unido.	17
2.2. LCA de tres tipos de bolsas de supermercado realizado por BCAL.	19
3.1. Características de las bolsas estudiadas en el ACV	22
3.2. Compuestos de las bolsa compostable de un solo uso.	24
3.3. Compuestos de las bolsas de un solo uso de PEAD	24
3.4. Compuestos de las bolsas de un solo uso de PEAD con aditivos oxodegradables	25
3.5. Compuesto de las bolsas de un solo uso de PEBD.	25
3.6. Compuestos de las bolsas reutilizables de PP no tejido.	25
3.7. Especificaciones técnicas de la maquinaria considerada para las bolsas de PEAD, PEBD y compostables.	26
3.8. Especificaciones técnicas de la maquinaria considerada para las bolsas de PP no tejido.	27
3.9. Peso de las bolsas desechadas a vertederos.	27
3.10. Energía consumida para fabricar las bolsas de PEAD	28
3.11. Total energía consumida para cada tipo de bolsa.	28
4.1. Resultados del EICV para los 5 tipos de bolsas estudiadas.	30
4.2. Ecotoxicidad marina de cada etapa en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente .	33
4.3. Agotamiento de recursos fósiles contribuidos por cada etapa en MJ.	36
4.4. Índice de cambio climático GWP100 en kg de CO2	38
4.5. Resultados del EICV para el caso de extrusora doble tornillo.	42
4.6. Comparación de la Ecotoxicidad marina obtenida al usar extrusora monotor- nillo y doble tornillo.	42
4.7. Comparación del Agotamiento de recursos fósiles obtenido al usar extrusora monotornillo y doble tornillo.	43
4.8. Comparación del Índice de cambio climático GWP100 al usar extrusora mo- notornillo y doble tornillo.	44
4.9. Ecotoxicidad marina para el caso con extrusora doble tornillo en kg de 1,4- diclorobenceno equivalente	45
4.10. Agotamiento de recursos fósiles para el caso con extrusora doble tornillo con- tribuidos por cada etapa en MJ.	46
4.11. Índice de cambio climático GWP100 para el caso con extrusora doble tornillo en kg de CO2	46
4.12. Comparación de la Ecotoxicidad Marina al usar PEAD virgen y 100 % reciclado.	46

4.13. Comparación del Agotamiento de recursos fósiles al usar PEAD virgen y 100 % reciclado.	47
4.14. Comparación del Índice de cambio climático GWP100 al usar PEAD virgen y 100 % reciclado.	48
4.15. Ecotoxicidad marina para el caso con PEAD 100 % reciclado en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente	49
4.16. Agotamiento de recursos fósiles para el caso con PEAD 100 % reciclado contribuidos por cada etapa en MJ.	51
4.17. Índice de cambio climático GWP100 para el caso con pellet de PEAD 100 % reciclado en kg de CO2	52
4.18. Resultados del EICV para el caso de reutilizar las bolsas de PEBD y PP	54
4.19. Comparación de la Ecotoxicidad marina obtenida entre el caso base y el de reutilización de las bolsas de PEBD y PP.	54
4.20. Comparación del Agotamiento de recursos fósiles obtenido entre el caso base y el de reutilización de las bolsas de PEBD y PP.	55
4.21. Comparación del Índice de cambio climático GWP100 obtenido entre el caso base y el de reutilización de las bolsas de PEBD y PP.	56
4.22. Ecotoxicidad marina para el caso con la reutilización de bolsas de PEBD y PP en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente.	58
4.23. Agotamiento de recursos fósiles para el caso de reutilizar las bolsas de PEBD y PP contribuidos por cada etapa en MJ	59
4.24. Índice de cambio climático GWP100 para el caso de reutilizar las bolsas de PEBD y PP en kg de CO2	61
4.25. Valores para el cálculo del índice de potencial de desperdicios en el caso base.	62
4.26. Cálculo del potencial de desperdicios	63
4.27. Valores para el cálculo del índice de potencial de desperdicios en el caso 3.	63
4.28. Cálculo del potencial de desperdicios para el caso 3.	64
5.1. Resultados del EICV para los 5 tipos de bolsas estudiadas.	66
A.1. Energía consumida para fabricar las bolsas de PEAD AD	75
A.2. Energía consumida pra fabricar las bolsas de PEBD	75
A.3. Energía consumida para fabricar las bolsas compostables	76
A.4. Energía consumida para fabricar las bolsas de PP.	76
B.1. Compuestos de las bolsas de PEBD cuando son reutilizadas 3 veces	77
B.2. Compuestos de las bolsas de PP cuando son reutilizadas 10 veces	77
B.3. Energía necesaria para fabricar las bolsas de PEBD reutilizadas 3 veces	77
B.4. Energía necesaria para fabricar las bolsas de PP reutilizadas 10 veces	77
B.5. Total de desechos en vertederos para las bolsas reutilizadas de PEBD y PP.	78

Índice de Ilustraciones

1.1. Fases de una ACV según la norma ISO 14040.	2
2.1. Polimerización de moléculas de polietileno a partir de meros de etileno	6
2.2. Ejemplo de secciones cristalinas y amorfas en polímeros	7
2.3. Bolsa tipo camiseta hecha de PEAD.	8
2.4. Bolsas big bag	9
2.5. Bolsas de TNT	9
2.6. Bolsa compostable comercializada en Chile	10
2.7. Extrusor monotornillo para plásticos	11
2.8. Máquina de soplado	12
2.9. Proceso de punzado con agujas	12
2.10. Máquina impresora	13
2.11. Máquina de sellado	14
3.1. Límites del sistema	23
4.1. Ecotoxicidad marina para los 5 tipos de bolsas en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente	31
4.2. Agotamiento de recursos fósiles para los 5 tipos de bolsas en MJ.	32
4.3. Índice de cambio climático GWP100 para los 5 tipos de bolsa en kg de CO2 equivalente.	32
4.4. Ecotoxicidad marina por etapas para las bolsas compostables en kg de 1,4- diclorobenceno equivalente.	33
4.5. Ecotoxicidad marina por etapas para las bolsas de PEAD en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente.	34
4.6. Ecotoxicidad marina por etapas para las bolsas de PEAD oxodegradable en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente.	34
4.7. Ecotoxicidad marina por etapas para las bolsas de PEBD en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente.	35
4.8. Ecotoxicidad marina por etapas para las bolsas de PP en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente.	35
4.9. Agotamiento de recursos fósiles por etapas para las bolsas compostables en MJ.	36
4.10. Agotamiento de recursos fósiles por etapas para las bolsas de PEAD en MJ.	36
4.11. Agotamiento de recursos fósiles por etapas para las bolsas de PEAD oxode- gradable en MJ.	37
4.12. Agotamiento de recursos fósiles por etapas para las bolsas de PEBD en MJ.	37

4.13. Agotamiento de recursos fósiles por etapas para las bolsas de PP en MJ.	38
4.14. Índice de cambio climático GWP100 por etapas para las bolsas compostables en kg de CO2 equivalente.	39
4.15. Índice de cambio climático GWP100 por etapas para las bolsas de PEAD en kg de CO2 equivalente.	39
4.16. Índice de cambio climático GWP100 por etapas para las bolsas de PEAD oxodegradable en kg de CO2 equivalente.	40
4.17. Índice de cambio climático GWP100 por etapas para las bolsas de PEBD en kg de CO2 equivalente.	40
4.18. Índice de cambio climático GWP100 por etapas para las bolsas de PP en kg de CO2 equivalente.	41
4.19. Ecotoxicidad marina obtenida utilizando extrusora doble tornillo en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente.	43
4.20. Agotamiento de recursos fósiles obtenido utilizando extrusora doble tornillo en MJ.	44
4.21. Índice de cambio climático obtenido utilizando extrusora doble tornillo en kg de CO2 equivalente.	45
4.22. Ecotoxicidad marina obtenida al utilizar PEAD 100 % reciclado en kg de 1,4-Diclorobenceno equivalente.	47
4.23. Agotamiento de recursos fósiles obtenido al utilizar PEAD 100 % reciclado en MJ.	48
4.24. Índice de cambio climático obtenido al utilizar PEAD 100 % reciclado en kg de CO2 equivalente.	49
4.25. Ecotoxicidad marina por etapa para bolsas de PEAD 100 % reciclado en kg de 1,4-Diclorobenceno equivalente.	50
4.26. Ecotoxicidad marina por etapa para bolsas de PEAD 100 % reciclado con aditivos oxodegradables en kg de 1,4-Diclorobenceno equivalente.	50
4.27. Agotamiento de recursos fósiles por etapa para bolsas de PEAD 100 % reciclado en MJ.	51
4.28. Agotamiento de recursos fósiles por etapa para bolsas de PEAD 100 % reciclado con aditivos oxodegradables en MJ.	52
4.29. Índice de cambio climático GWP100 por etapa para bolsas de PEAD 100 % reciclado en kg de CO2.	53
4.30. Índice de cambio climático por etapa para bolsas de PEAD 100 % reciclado con aditivos oxodegradables en kg de CO2.	53
4.31. Ecotoxicidad marina obtenida al reutilizar las bolsas de PEBD y PP en kg de 1,4-Diclorobenceno equivalente.	55
4.32. Agotamiento de recursos fósiles obtenida al reutilizar las bolsas de PEBD y PP en MJ.	56
4.33. Índice de cambio climático GWP100 obtenida al reutilizar las bolsas de PEBD y PP en kg de CO2 equivalente.	57
4.34. Ecotoxicidad marina obtenida por etapas al reutilizar las bolsas de PEBD en kg de 1,4-Diclorobenceno equivalente.	58
4.35. Ecotoxicidad marina obtenida por etapas al reutilizar las bolsas de PP en kg de 1,4-Diclorobenceno equivalente.	59

4.36. Agotamiento de recursos fósiles obtenido por etapas al reutilizar las bolsas de PEBD en MJ.	60
4.37. Agotamiento de recursos fósiles obtenido por etapas al reutilizar las bolsas de PP en MJ.	60
4.38. Índice de cambio climático GWP100 obtenido por etapas al reutilizar las bolsas de PEBD en kg de CO2 equivalente.	61
4.39. Índice de cambio climático GWP100 obtenido por etapas al reutilizar las bolsas de PP en kg de CO2 equivalente.	62

Capítulo 1

Introducción

El presente trabajo de título tiene como motivo analizar y cuantificar el ciclo de vida de los principales tipos de bolsas de supermercado en Chile, dado que actualmente no existe un registro de esto; esto podría ayudar en la toma de decisiones para mejoras medioambientales y de producción en el país al tener conocimiento de los impactos que cada bolsa conlleva. También se desea incorporar elementos de la ingeniería mecánica, como la manufactura, para analizar cómo afectan a la fabricación de estos productos. En la siguiente sección, se mencionan los antecedentes básicos que se necesitan para entender este trabajo, así como la motivación y sus objetivos.

1.1. Antecedentes Generales Básicos

1.1.1. Análisis de Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida es un método para cuantificar y analizar el impacto ambiental atribuible al ciclo de vida de productos, servicios y, en ocasiones, procesos. Hoy en día es una herramienta bien integrada en el manejo ambiental, que se rige por las normas ISO 14040-14044 (ISO 2006).

Un completo análisis de ciclo de vida (ACV) tiene un enfoque de la “cuna a la tumba”, incluyendo cada etapa del ciclo de vida: diseño/desarrollo del producto, obtención de la materia prima, manufactura, actividades de uso/mantenimiento/re-uso y fin de la vida. La metodología consta de los siguientes 4 pasos:

- **Definición de metas y alcances:** Se explicitan los límites del sistema para que ninguna información relevante sea omitida.
- **Análisis de inventario (ICV):** Basándose en balances de materia y energía, se compilan y cuantifican los inputs (materia prima y energía) y outputs (desechos y otras emisiones) relevantes al sistema.

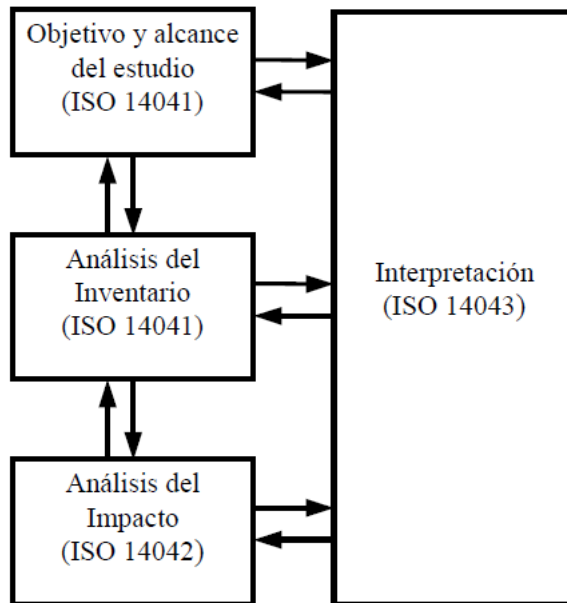


Figura 1.1: Fases de una ACV según la norma ISO 14040.

- **Análisis de impacto (EICV):** Se agregan e identifican las cargas ambientales obtenidas del paso anterior, en categorías de impacto ambiental (Azapagic and Clift 1999). Estas pueden ser de cambio climático, reducción de la capa de ozono, creación de ozono troposférico, eutroficación, uso de agua y tierra, etc.
- **Interpretación:** Se generan conclusiones de acuerdo con los daños ambientales que genera el sistema [1].

1.1.2. Bolsas plásticas y su impacto ambiental

Las bolsas plásticas son un tipo de empaque, hechas de un material flexible, ligero y fino, cuya principal función es contener alimentos, desechos u otros bienes de consumo. Sus bajos costos de fabricación y amplias propiedades han hecho que sean uno de los productos más consumidos a nivel mundial; según R. M. Miller, se fabrican de 500 billones a un trillón de bolsas plásticas cada año [2].

Su forma más conocida es la tipo camiseta, que corresponde a la bolsa con dos asas en su parte superior y sellada térmicamente en sus bordes. Esta fue patentada en el año 1965 por la empresa sueca Celloplast y comenzó rápidamente a conquistar el mercado de las bolsas en Europa. En los años 70 fueron exportadas al extranjero, donde reemplazan a las bolsas de papel y algodón y logran abarcar el 80% del mercado en EE.UU., para finalmente dominar a nivel mundial la producción de las bolsas a finales de los años 80 [3]. Sin embargo, ya en el año 1972 comenzaba la preocupación por su vasta producción: E. J. Carpinter y K. L. Smith declararon en una publicación para la revista Science que: "el aumento en la producción de plástico, combinado con el manejo actual de desechos, probablemente traerá mayores concentraciones en la superficie marina".

Los bajos índices de re-uso y reciclaje a nivel mundial y sus casi 500 años de degradación en la tierra han provocado severa acumulación de basura plástica en tierra y mar, siendo este último el más afectado. Estudios recientes muestran que dentro de los 275 millones de toneladas de desechos plásticos generados en 192 países costeros, entre 4,8 y 12,7 millones van a parar al mar [4], donde se estima que el polietileno se encuentra presente en el 79 % de estos los residuos [5]. Adicionalmente, la alta flotabilidad de los desechos plásticos provoca que sean expuestos a rayos UV y temperaturas más altas en la superficie de los océanos, facilitando su fragmentación [6], lo que afecta a especies acuáticas que mueren por la ingesta de pedazos de plásticos. Otro grave problema ambiental es la emanación de componentes tóxicos en el ecosistema marino; para mejorar sus propiedades, las bolsas plásticas son hechas con componentes químicos que pueden ser biotóxicos.

Para combatir los efectos nocivos de la producción de bolsas plásticas varios países del mundo han implementado legislativas que regula el consumo y producción de las bolsas. En 2002 Bangladesh fue el primer país en prohibir las bolsas plásticas delgadas, luego de descubrir que son el principal causante de la obstrucción del sistema de drenaje utilizado en inundaciones desastrosas. En tanto en la región, México fue el primer país en vetar las bolsas plásticas no biodegradables durante el año 2010, mientras que en el año 2016 Colombia impidió la circulación de bolsas plásticas de 30x30 centímetros e impuso un impuesto para regular su uso. En 2018, Argentina también prohibió las bolsas plásticas no biodegradables en supermercados y autoservicios, entre otros países latinoamericanos que han decidido intervenir en la problemáticas de desechos plásticos. A nivel global, Francia realiza esta prohibición en el año 2016, mientras que Corea de Sur lo hace durante el año 2018.

En cuanto a la situación de Chile, no es muy distinta al escenario mundial: durante el año 2018 Directemar recolectó 171.840 kilogramos de basura en 123 playas del territorio nacional, donde 24.186 kilos corresponden a plásticos y bolsas, lo que equivale al 14 % del total. Según las cifras del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) en Chile solo el 5 % de las bolsas plásticas son recicladas, lo que sumado a una alta producción nacional – 3.400 millones de unidades durante el 2017 [7] – genera que sean un gran contribuyente en la contaminación de las costas nacionales.

Para contrarrestar esto, en el año 2013 la ciudad de Pucón emite una ordenanza municipal que prohíbe la entrega de bolsas en el comercio, situación que a lo largo de los años fue emulada por otras 62 municipalidades. Finalmente, el 3 de Agosto de 2018 comienza a regir en Chile la ley 21.100 – más conocida como *Chao Bolsas Plásticas* – que prohíbe la entrega de bolsas plásticas desechables en los grandes comercios. Como resultado, el MMA calcula que se han dejado de entregar 2.200 millones de bolsas a lo largo de Chile a un año de su implementación [8].

Por otro lado, muchas empresas del rubro han quebrado, mientras que los distribuidores de polietileno han disminuido sus ventas en un 10 %. Plásticos Mendozas es una empresa productora de bolsas plásticas que concentraba el 38 % del consumo de polietileno destinado a bolsas tipo camiseta en Chile y producto de la ley disminuyó su producción en un 50 %. Hoy en día la empresa cuenta con menos de 10 trabajadores y 5 máquinas en las que se dedican a hacer bolsas plásticas con material reciclado que van destinadas a Perú [9].

Otra de las consecuencias de las nuevas políticas que inhabilitan las bolsas plásticas de un solo uso alrededor del mundo, corresponde al uso de bolsas reutilizables de algodón, papel, polipropileno o polietileno de baja densidad (PEBD) como alternativas. Sin embargo, estudios recientes muestran que las bolsas reutilizables hechas de PEBD generan menores impactos para la mayoría de las categorías ambientales en cuanto a producción y desecho [10]. Otro estudio realizado en Estados Unidos indica que las bolsas reutilizables de PEBD tienen un mejor perfil ambiental que una bolsa hecha de PEAD con 30% de material reciclable (si es usada 6,2 veces) y que una bolsa de papel hecha 100% de material reciclable (si se reusa 1,7 veces) [11].

En Chile no existe un estudio que englobe los efectos medioambientales que estos sustitutos provocan en el país, por lo que, no es posible hacer un juicio informado acerca de los beneficios a corto y largo plazo de la prohibición. Por un lado, expertos indican que existen bolsas de papel con muy baja degradabilidad e incluso con biotoxicidad y por otro, en el país no se reciclan las bolsas de textil no tejido (TNT), por lo que, al romperse estas pasan a ser un desecho y provoca los mismos daños que una bolsa de un solo uso [8]. Otro problema es que existen vacíos legales en la ley, pues esta indica que se prohíben las bolsas cuyo componente principal es un polímero proveniente del petróleo. En consecuencia, Walmart comenzó a distribuir bolsas hechas de polietileno proveniente de caña de azúcar, cuyo comportamiento es similar a la de un plástico convencional y tiene las mismas consecuencias ambientales.

1.2. Motivación

Debido a su largo proceso de descomposición y uso de corta duración, las bolsas de supermercado son uno de los productos que más residuos deja en la Tierra actualmente. Para combatir esto, se han creado nuevos productos que cumplen la misma función o cuya degradación es más corta, pero éstas pueden generar un mismo nivel de impacto ambiental en su proceso de producción que las bolsas tipo ‘camiseta’.

A diferencia de otros países que han vetado la distribución de bolsas plásticas como forma de reducir los impactos ambientales, Chile no cuenta con un análisis de ciclo de vida de los distintos tipos de bolsas existentes en el mercado, por lo que, esta es la principal motivación para la realización de este trabajo. Además, se espera realizar un análisis comparativo para determinar las óptimas condiciones de fabricación ligadas a la manufactura de las bolsas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar el análisis de ciclo de vida de las bolsas de plástico en Chile y cómo influyen diversos métodos de manufactura y uso en él.

1.3.2. Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general se necesita de una serie de objetivos específicos durante el trabajo de título. Estos corresponden a:

- Estudiar la producción de 4 tipos de bolsas plásticas en Chile.
- Modelar los procesos de producción de las bolsas en un software de ACV.
- Obtener indicadores de impacto ambiental mediante el software.
- Realizar un análisis de sensibilidad para los procesos de producción.
- Realizar una comparación con los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Antecedentes Específicos

2.1. Polímeros

El compuesto principal de las bolsas plásticas son los polímeros, que corresponden a macromoléculas que se forman por la unión de varias unidades repetitivas, conocidas como monómeros, mediante enlace covalente. A su vez, estos se van entrelazando entre sí a través de otros enlaces y van generando largas cadenas.

Los primeros polímeros fueron fabricados con materiales orgánicos naturales, siendo la celulosa el ejemplo más común; mientras que el primer polímero hecho por el hombre – o sintético – corresponde a la *baquelita*, un fenol formaldehído que toma su nombre en honor a L. H. Baekeland y que fue descubierta en 1906. Más adelante, se logra la fabricación de polímeros sintéticos a base de carbón y petróleo, lo que daría paso a la tecnología moderna de los plásticos en la década de 1920.

La forma en la cual se sintetizan los polímeros se llama *polimerización* y corresponde al entrelazamiento cruzado de diferentes monómeros. En la figura 2.1 [12], se muestra la polimerización de polietileno: ésta se lleva a cabo como una reacción en cadena en la cual se agrega un catalizador que permite la unión mediante enlace covalente de los meros de etileno, que está formado por átomos de hidrógeno y carbono. A su vez, las cadenas de polímeros están unidas por enlaces secundarios, como los de Van der Waals, hidrógeno e iónicos [13].

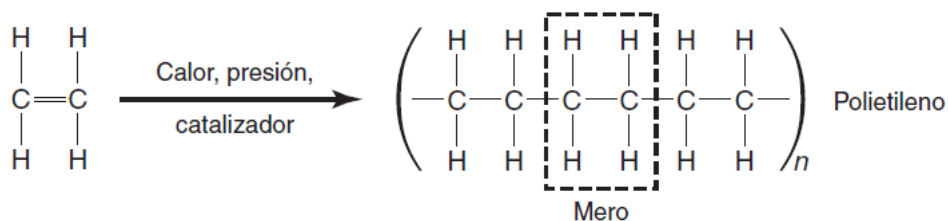


Figura 2.1: Polimerización de moléculas de polietileno a partir de meros de etileno

Sus propiedades dependen tanto del tipo de enlace generado en su polimerización, como de su estructura y peso molecular, lo que los convierte en materiales muy versátiles. Sumado a su bajo costo de producción y fácil manufactura, los polímeros están presentes en áreas de la construcción, salud, electrónica, etc. Dentro de sus propiedades más importantes en la industria se encuentran: alta relación resistencia a peso, gama de temperatura útil hasta los 350°C, baja conductividad térmica y eléctrica y resistencia a los componentes químicos.

Uno de los aspectos más importantes de los polímeros corresponde al *grado de cristalinidad*, dado que tiene gran influencia en la densidad, dureza, transparencia y difusión. Mediante el control de la rapidez de solidificación durante el enfriamiento y la estructura de la cadena, es posible aportar diferentes grados de cristalinidad a los polímeros, aunque nunca al 100%. Aquellas cadenas de polímeros que no poseen un patrón repetitivo de largo alcance – tienen un arreglo parecido a un plato de espagueti – se les conoce como polímeros amorfos; la figura 2.2 [14] muestra cadenas con regiones amorfas y cristalinas. La cristalinidad varía desde un cristal casi completo (de casi 95% en volumen en el caso del polietileno) hasta polímeros ligeramente cristalizados, en su mayoría amorfos. El grado de cristalinidad también se ve afectado por la ramificación. A medida que aumenta la cristalinidad los polímeros se vuelven más rígidos, menos dúctiles y más resistentes a los solventes y al calor [13].

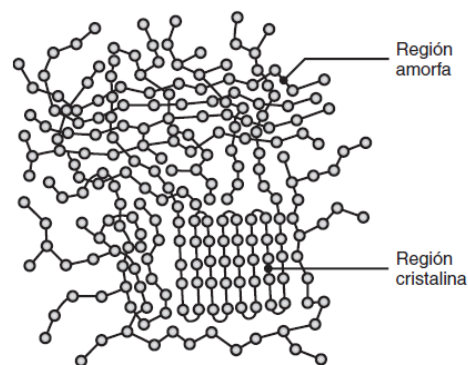


Figura 2.2: Ejemplo de secciones cristalinas y amorfas en polímeros

La degradación polimérica es un cambio en las propiedades de un polímero o de un material cuya base es un polímero, debido a la influencia de factores ambientales como calor, luz, químicos o alguna fuerza aplicada. La degradación suele ser producto de un cambio en la estructura química y/o física de la cadena polimérica, lo que lleva a una baja en el peso molecular del polímero. La radiación ultravioleta y el oxígeno logran degradar los polímeros de forma natural, donde debilitan y rompen los enlaces primarios, provocando la escisión (separación) de las moléculas de la cadena larga de polímeros, lo que los vuelve frágiles y rígidos [15].

2.2. Polietileno de alta densidad

El polietileno de alta densidad se genera por un proceso de baja presión, que permite la polimerización del etileno gracias a un catalizador a base de aluminio. El proceso se lleva a cabo a presiones del orden de 10 – 80 bar y a temperaturas de 70 – 300°C, generando polietileno con un rango de densidad de 0.94 – 0.97 [g/cm³], que se encuentra comercialmente en forma de pequeños pellets.

Este material es caracterizado por su falta de ramificación o capacidad de desviar sus

cadenas de polímeros, por lo que, su estructura molecular es lineal. Esto permite que sea ligero, pero con una alta resistencia a la tracción. Entre otras propiedades, puede soportar temperaturas de hasta 120°C sin ser afectado, no absorbe líquido con facilidad y es muy resistente a varios tipos de químicos. Es por esto que el PEAD es utilizado en diversos ámbitos comerciales y es el principal componente de las bolsas tipo camiseta, mostradas en la figura 2.3 [16].

La degradación del polietileno de alta densidad, sin procesos acelerantes como altas temperaturas o radiación de rayos UV, puede tardar más de 150 años y es una de las principales razones por la que este material se encuentra en gran parte de la basura oceánica y terrestre hoy en día [15].

En cuanto a su reciclaje, el PEAD es considerado como uno de los polímeros más fáciles de reciclar y es aceptado en la mayoría de los centros de reciclaje (número 2). En ellos, el PEAD es separado por medio de un catalizador, triturado y fundido para una mejor refinación del polímero, para luego ser enfriado en pellets que suelen ser usados en la manufactura de juguetes, tachos de basura y de reciclaje, etc.



Figura 2.3: Bolsa tipo camiseta hecha de PEAD.

2.3. Materiales oxodegradables

Los plásticos oxodegradables están constituidos de polímeros provenientes del petróleo y contienen aditivos especiales para acelerar su proceso de degradación. Estos aditivos son sales metálicas, cuyo origen suelen ser metales de transición como el níquel, cobalto y manganeso. Ellos catalizan la ruptura de las largas cadenas moleculares, lo que hace que el plástico se vuelva frágil y se fragmente en pequeñas piezas.

Su capacidad de degradación está considerada en un plazo de 2 a 5 años, sin embargo, esto depende de las condiciones climáticas (radiación solar, humedad, etc.) a la que estén sometidos. Así mismo, no son considerados biodegradables (no se transforman en dióxido de carbono y agua por medio de bacterias), ya que esto solo ocurre de manera muy lenta una vez que el material ya ha sido fragmentado. Tampoco son compostables y no pueden ser reciclados con el resto de los polímeros, pues los aditivos hacen que los plásticos comunes sean más susceptibles a la degradación. Sin embargo, se considera que la mejor forma de desecho de este material es la de incineración con recuperación de energía [17].

2.4. Polietileno de baja densidad

A diferencia del polietileno de alta densidad, este tipo de material se fabrica mediante un proceso de alta presión, que ocasiona una polimerización por radicales libres. Posee una

densidad de $0.917 - 0.94 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, ligeramente menor que la del PEAD, y alrededor del 2% de sus cadenas son ramificadas, lo que provoca que tenga una resistencia a la tracción menor. Sin embargo, la ramificación le otorga una mayor resiliencia, que corresponde a la energía de deformación que puede ser recuperada de un cuerpo deformado cuando cesa el esfuerzo que causa la deformación.

Además de esto, su flexibilidad hace que este material sea utilizado como contenedores gruesos, unidades de disco duro y film plástico, siendo las bolsas plásticas su uso más común. A pesar de ser un material reciclable (número 4), se calcula que solo se recicla el 1% de toda la producción a nivel mundial y dado que tiene una degradación promedio de 150 años, es un gran contribuyente de la basura plástica hoy.

2.5. Tejido no tejido

Los textiles tejidos corresponden a fibras entrelazadas de manera vertical y horizontal, lo que crea un textil flexible y resistente. Este tipo de textil hecho de fibras plásticas se conoce como 'big bag' – mostrado en la figura 2.4 [18] – y es muy utilizado en la agricultura y construcción, pues es capaz de soportar una carga de hasta 2 toneladas. Por otro lado, el tejido no tejido (TNT) es un tipo de material textil formado a partir de una serie de fibras unidas por procedimientos mecánicos, térmicos o químicos, pero que no requieren ser tejidas; este tipo de bolsas son comúnmente comercializadas como se muestran en la figura 2.5 [19]. Se suelen utilizar fibras colocadas en capas o cruzadas para darle el aspecto de un textil, unidas de manera mecánica con agujas, con adhesivos o mediante algún proceso en el que se utilice calor. Ambos textiles se diferencian principalmente en la capacidad de carga que tienen, siendo los textiles tejidos aquellos con mayor cabida.



Figura 2.4: Bolsas big bag



Figura 2.5: Bolsas de TNT

El material más usado para la confección de fibras de tejidos no tejidos corresponde al polipropileno (PP). Este polímero se obtiene de la polimerización del propeno (C_3H_6) y posee una densidad relativamente baja de $0,85 - 0,95 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, que lo hace ligero y respirable. Otra

de sus ventajas es que su resina no es tóxica, lo que la hace 100 % reusable y durable, además de tener una alta resistencia a la tensión, capaz de soportar varios kilogramos sin romperse.

Los TNT proveen funciones variadas como absorbancia, repelencia líquida, flexibilidad, resistencia, piroresistencia, aislamiento térmico, filtración, esterilidad y barreras contra bacterias. Esto permite que este material sea utilizado para diversos productos, en el área de la medicina (máscaras, batas quirúrgicas, guantes, cubre zapatos, etc), filtros (de gasolina y aceites, líquidos y polvo) y geotextiles (control de erosión, sistemas de drenaje, protección de geomembranas, etc). Además de otros usos comunes, como higiene femenina, toallas de limpieza y bolsas de supermercado.

2.6. Materiales compostables

Un material que está cobrando fuerza en materia de sustentabilidad, corresponde a los plásticos biodegradables. La biodegradabilidad significa que las que las especies microbianas en el ambiente degradan una porción o la totalidad del polímero, sin producir elementos tóxicos. Por otro lado, los materiales compostables son aquellos que pueden ser degradados por la acción de organismos, produciendo CO₂, agua, materia inorgánica y biomasa bajo condiciones determinadas y en un tiempo controlado. La diferencia está en que los materiales biodegradables suelen dejar residuos metálicos, mientras que los compostables dejan residuos que sirven de abono para plantas y árboles.

De acuerdo con la norma europea EN13432, un material se denomina compostable si se demuestra que:

- El material de empaque y sus componentes orgánicos relevantes (que posean peso mayor al 1% del peso total) son naturalmente biodegradable;
- La desintegración del material de empaque toma lugar en un proceso de compostaje para materia orgánico dentro de un tiempo estipulado;
- El material de empaque no tiene efectos negativos en el proceso de compostaje;
- La calidad del compostaje no se ve afectado por el material de empaque. [20]

En la actualidad, en Chile se comercializan bolsas hechas de MATER-BI®, que han pasado las pruebas de biodegradación marina y cumplen con la norma europea de compostaje, o de almidón de maíz y policaprolactona, como la bolsa que se observa en la figura 2.6 [21].

Del almidón se extrae ácido láctico y se genera el ácido poliláctico; éste corresponde a un poliéster biodegradable que se degrada de forma aeróbica (en presencia de oxígeno), aunque



Figura 2.6: Bolsa compostable comercializada en Chile

lo hace de forma más lenta que el resto de los poliéster biodegradable [22]. En cuanto a sus propiedades mecánicas, éstas se asemejan al tereftalato de polietileno (PET), material comunmente usado en botellas desechables y otros empaques. También se caracteriza por tener una alta energía de superficie – o alta capacidad de atracción molecular –, lo que le otorga facilidad para ser impresa; su uso más conocido es como resina para impresiones 3D.

Por otro lado, la policaprolactona se obtiene a partir de la polimerización de caprolactona y posee un punto de fusión bajo, por lo que, se considera como un plástico capaz de ser moldeado a mano. Se utiliza frecuentemente para mejorar la resistencia al impacto de resinas y para mejorar su biodegradación, sobretodo proveniente del almidón. Además posee una estructura uniforme, lo que le permite cristalizarse con facilidad; la policaprolactona cristalina se asemeja al polietileno.

2.7. Manufactura de las bolsas

En esta sección, se incluyen imágenes de maquinaria tomadas durante una visita a la fábrica de plásticos Mendoza, mencionada en la sección 1.1.2.

Extrusión

Los pellets de plástico son introducidos en la tolva de la extrusora, ilustrada en la Figura 2.7 [23], donde son calentados por medio de calentadores hasta una temperatura cercana a la de su fusión, de modo de volverlos inestables y moldearlos con facilidad. El plástico avanza de forma horizontal por el movimiento del tornillo, donde se generan tres secciones: sección de alimentación, donde recibe precalentamiento; sección de compresión, donde el polímero adquiere consistencia líquida, se extrae el aire del fundido y se comprime el material; y sección de medición, en la cual se homogeniza el fundido y se genera presión suficiente para bombearlo a través de la apertura del troquel.

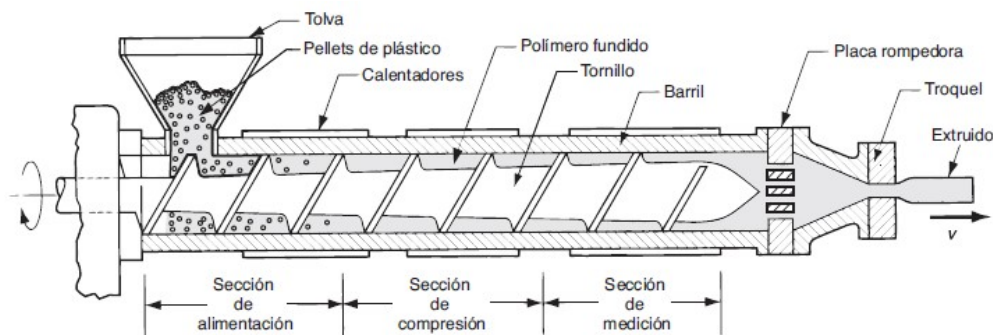


Figura 2.7: Extrusor monotornillo para plásticos

Soplado

Una vez extruido el material, este pasa por un proceso de soplado transversal. Aquí, el material extruido es jalado hacia arriba estando aún fundido, y se expande de forma

simultánea por el aire que entra a través del mandril del troquel. La presión del aire debe mantenerse constante de modo de mantener uniforme el espesor de la película y el diámetro del tubo. El efecto de inflado permite que el polímero sea estirado en ambas direcciones, por lo que obtiene propiedades isotrópicas de resistencia.



Figura 2.8: Máquina de soplado

La línea de congelación delimita la posición en la que el polímero es solidificado, mientras asciende guiado por rodillos. Finalmente, la burbuja culmina en rodillos de presión, los que exprimen el aire una vez se ha enfriado, y se colecta el tubo plano en un carrete. La imagen 2.8 muestra el proceso de soplado en una máquina.

Tejido

En el caso de los textiles existe un término de manufactura que se utiliza para su confección: *needle punching* o punzonado con agujas. Este se define como el método físico de entrelazar mecánicamente redes de fibras utilizando agujas puntiagudas para reubicar algunas fibras de una orientación horizontal a una vertical [24].

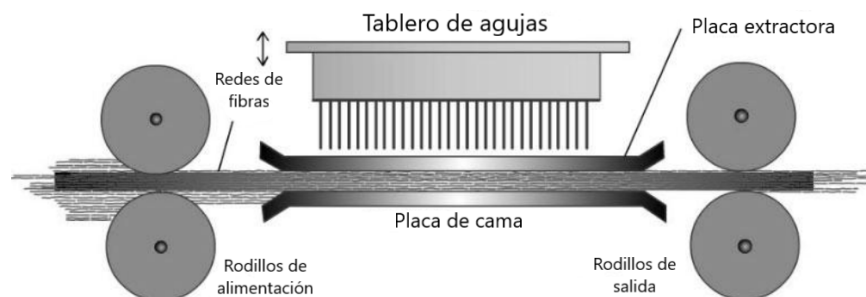


Figura 2.9: Proceso de punzado con agujas

La imagen 2.9 [25] muestra un esquema de este proceso. En primera instancia, los rodillos de entrada alimentan a la máquina con redes de fibra del material en forma de telarañas, donde llegan a las placas. La placa de cama sirve como límite y de ayuda para la compresión del material, mientras que la placa extractora remueve las fibras de la aguja para que el material pueda avanzar. El tablero de agujas permite el punzado del material de forma repetida con movimientos verticales. Con esto las fibras se entrelazan y la compresión de las redes crean una fricción interna que permite la adhesión del material.

La acción provocada por el punzado de las agujas se repite varias veces por minuto y en ocasiones se pueden tener varias zonas de punzado para obtener una compresión y adhesión deseada. También, existen diversos tipos de agujas dependiendo del tipo de material o del resultado que se quiera obtener.

Impresión, Corte y Sellado

Si se desea que las bolsas tengan alguna impresión para publicidad, la película de polietileno obtenida por soplado se somete a rodillos y tinteros de una impresora rotativa flexográfica – técnica de impresión de alta velocidad que utiliza una placa flexible con relieve.



Figura 2.10: Máquina impresora

Luego, las bobinas impresas o no impresas pasan por una máquina de corte, la cual es programada para cortar las dimensiones de la bolsa deseada. En el caso de las bolsas de supermercados, una vez son cortadas, pasan a un proceso de doblez para dar lugar a las asas, y finalmente se divide el film de forma transversal, mientras unos cabezales sueldan la base por medio de un proceso térmico.

Una vez dimensionadas e impresas, las bolsas son selladas por medio de tratamientos térmicos, donde un componente metálico genera calor y funde el material. El calor ablanda al plástico y este pasa a un estado viscoso, donde se asegura una buena unión aplicando presión. En el caso de las bolsas TNT, estas pueden ser soldadas o cocidas.

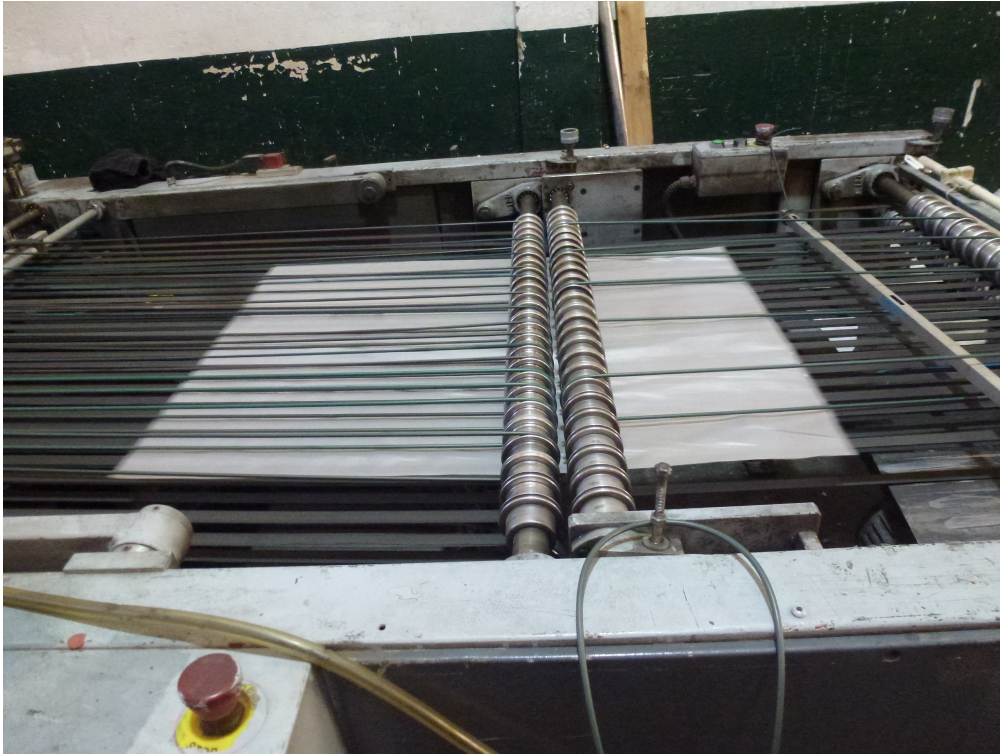


Figura 2.11: Máquina de sellado

2.8. Categorías de Impacto Ambiental

Para el ACV se utilizará la Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida (EICV) correspondiente a *CML (baseline)*. Este es un método de impacto ambiental que restringe la cadena causa-efecto a sus etapas tempranas con el objetivo de limitar sus incertidumbres.

Índice de Cambio Climático (ICC)

El cambio climático se define como el aumento de temperatura global provocado por el efecto de los gases de invernadero (GEI) que las actividades humanas generan. Se espera que este aumento de temperatura genere perturbaciones climáticas, desertificación, aumento de niveles del mar y propagación de enfermedades. La cuantificación de este potencial se basa en factores desarrollados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), que se expresan como un Potencial de Cambio Climático o Global Warming Potential sobre un horizonte de tiempo de diversos años, siendo el más común 100 años (GWP100). Este potencial se mide en la unidad de referencia: kg de CO₂ equivalente y se conoce como *huella de carbono*.

Agotamiento de Recursos Abióticos

Esta categoría corresponde a la disminución en la disponibilidad de recursos no biológicos (renovables o no) debido a su uso insostenible. Estos recursos pueden ser combustibles fósiles, minerales, metales, agua, etc. por lo que su unidad de medida dependerá del modelo; puede corresponder a MJ de combustibles fósiles, kgs de minerales, m³ de agua o kgs de antimonio equivalente.

Ecotoxicidad

Los análisis de toxicidad producto de algunas sustancias, como metales pesados, son basados en los máximos tolerables de concentración en los ecosistemas acuáticos. Estos índices son calculados bajo el modelo de toxicidad de la Unión Europea, EUSES, cuyo método describe el destino, exposición y efectos de sustancias tóxicas en el ambiente. El indicador de impactos se basa en la pérdida de biodiversidad y/o extinción de especies como respuesta toxicológica y se mide con la unidad de referencia, kgs de 1,4-diclorobenceno equivalente (1,4-DBeq) [26].

2.9. Potencial de Desperdicios

Uno de los principales problemas ambientales en torno a las bolsas plásticas corresponde al *littering* o la generación de desperdicios en el ambiente debido a la masividad de su producción y largos años de degradación. Es por esto que en el libro Science of the Total Environment [27] crean una propuesta para calcular el potencial que las bolsas como desechos generan tanto en la tierra como en el mar.

Este indicador considera cuatro parámetros:

- **P1 Cantidad de bolsas:** Corresponde al número de bolsas indicado en la unidad funcional del ACV y el área de superficie de una de ellas. Está definida como:

$$P1 = \frac{n * S}{(n * S)_{max}} \quad (2.1)$$

donde:

n: número de bolsas que satisfacen la unidad funcional

S: área de la superficie de un lado de la bolsa [m²]

(n*S)_{max}: máximo resultado entre las bolsas

- **P2 Liberación al ambiente:** Representa la probabilidad de la bolsa de ser abandonada en el ambiente. Para esto, se considera el precio de la bolsas debido a que una bolsa que cuesta más, tiene una menor probabilidad de ser abandonada por el cliente. Es calculada como:

$$P2 = \frac{p}{p_{max}} \quad (2.2)$$

donde:

p: precio de las bolsas [CLP]

p_{max} : precio máximo entre las bolsas [CLP]

- **P3 Dispersión Ambiental**: Corresponde a la flotabilidad de las bolsas y la probabilidad de volarse . Se define a partir del peso de cada bolsa. Se calcula como:

$$P3 = \frac{w}{w_{max}} \quad (2.3)$$

donde:

w: peso de la bolsa [g]

w_{max} : peso máximo entre las bolsas [g]

- **P4 Persistencia Ambiental**: Determinada por la biodegradabilidad de las bolsas y por cuánto tiempo se quedan en el ambiente luego de ser abandonadas. Se define como:

$$P4 = \frac{d}{d_{max}} \quad (2.4)$$

donde:

d: velocidad de degradación de la bolsa [1/día]

d_{max} : velocidad máxima de degradación entre las bolsas [1/día]

El potencial de desperdicios se define entonces como:

$$LP = \frac{P1^{f1}}{P2^{f2} P3^{f3} P4^{f4}} \quad (2.5)$$

donde:

f1, f2, f3, f4: factores de ponderación (todos igual a 1, hasta que exista más investigación al respecto).

2.10. Revisión Bibliográfica

A continuación, se realiza un breve resumen de 3 estudios similares a este trabajo y que fueron elaborados alrededor del mundo. En ellos, se analizan distintos tipos de bolsas de supermercado – no solo plásticas – y se realiza un ACV en base a los criterios de fabricación propios de cada país. Estos reportes fueron estudiados para tener nociones de los pasos a considerar al realizar un ACV y de los resultados esperados de este trabajo.

Life cycle assessment of supermarket carrier bags: a review of the bags available on 2006 [28]

Reporte elaborado por Environment Agency en el Reino Unido, emitido en febrero del 2011. El estudio se basó en el análisis de ciclo de vida de 7 tipos de bolsas de supermercado, considerando que cada tipo debe cargar el equivalente a un mes de compras durante el 2006/07.

Dado que todas las bolsas poseen características físicas distintas, se escoge una *unidad funcional*, que corresponde al peso volumétrico que debe cargar cada tipo de bolsa para que exista una equivalencia entre ellas. Para este reporte se considera que las bolsas deben cargar las compras de un mes, equivalente a 438 productos. Un estudio realizado previamente por esta agencia en los supermercados del Reino Unido, determina que los clientes colocan un promedio de 5,88 productos en una bolsa cuya capacidad es de 19,1 litros. En base a esto la tabla 2.1 identifica los tipos de bolsas, su capacidad volumétrica y la cantidad considerados en el ACV.

Tabla 2.1: Tipos de bolsas analizadas en el LCA elaborado por Environment Agency en el Reino Unido.

Tipo de bolsa	Capacidad volumétrica [litros]	Número de bolsas analizadas
Bolsa convencional de PEAD	19.1	82.14
Bolsa de PEAD con aditivos oxodegradantes	19.1	82.14
Bolsa de poliéster de almidón	19.1	82.14
Bolsa de papel	20.1	60.68
Bolsa de PEBD	21.52	60.68
Bolsa de PP	19.75	66.13
Bolsa de algodón	28.65	45.59

El estudio corresponde a un análisis de "la cuna a la tumba", por lo que el sistema incluye las siguientes etapas: extracción de materia prima para las bolsas y para el packaging de éstas, transporte de la materia prima, del producto fabricado y del desecho, manufactura de las bolsas, reutilización y fin de vida. Dentro de los procesos excluidos, se encuentran tintas

y colorantes, transporte desde el supermercado al consumidor y equipo de capital.

Como conclusiones, el estudio deliberó que la bolsa convencional de PEAD posee el menor impacto en 8 de las 9 categorías ambientales analizadas; mientras que la bolsa de poliéster de almidón tiene los mayores impactos en 7 de las 9 categorías. Esto se debe en parte a su elevado peso en comparación a las bolsas livianas y también por los altos impactos en la extracción de materia prima y producción de metano en vertederos. En cuanto a los usos, el estudio concluyó que la bolsa de PEBD debe ser usada 5 veces para disminuir su índice GWP (Global Warming Potential) por debajo del de una bolsa de PEAD; la bolsa no-tejida de PP debe ser usada 14 veces y la de papel, 4 o más veces para lograr esto. Mientras tanto, la bolsa de algodón continúa teniendo mayores impactos que la bolsa de PEAD en 7 de las 9 categorías aún siendo usada 173 veces.

Finalmente, el estudio realizó un análisis de sensibilidad para investigar los efectos de la reutilización de las bolsas y el aumento del reciclaje y compost en el fin del ciclo de vida. En cuanto al reciclaje, el estudio consideró que se utiliza el 40 % de las bolsas livianas como bolsa de basura y finalmente son tratadas como residuos municipales; el restante 60 % se irá a reciclaje o compost, excluyendo las bolsas oxodegradables, porque son nocivas para la calidad del producto reciclado. Frente a este escenario, se concluye que provocan una reducción pequeña en los impactos de Calentamiento Global y agotamiento de recursos.

En cuanto al uso secundario de las bolsas, el estudio evalúa tres escenarios tomando de base a las bolsas de PEAD; dado que esta bolsa es la que posee una menor huella de carbono, el estudio quiere determinar cuántas veces se tienen que reutilizar el resto de las bolsas para lograr tener un menor ICC que ellas. En el primer caso, las bolsas de PEAD no se reutilizan y el estudio indica que las bolsas de papel deben reutilizarse 3 veces para lograr una menor huella de carbono, mientras las de PEBD, PP y algodón deben hacerlo 4, 11 y 131 veces, respectivamente. En el segundo escenario, el 100 % de las bolsas de PEAD tienen un uso secundario como bolsas de basura y el análisis arroja que las bolsas de papel deben reutilizarse 7 veces para lograr menos ICC, en tanto las de PEBD, PP y algodón deben reutilizarse 9, 26 y 327 veces, respectivamente. Finalmente, el tercer escenario contempla que las bolsas de PEAD son reutilizadas como bolsas de supermercado 3 veces y los resultados son similares al anterior; las bolsas de papel deben reutilizarse 9 veces, mientras que las de PEBD, PP y algodón deben hacerlo 12, 33 y 393 veces, respectivamente. Esto da cuenta de la enorme huella de carbono que poseen las bolsas de algodón y que deben reutilizarse más de una vez por día durante un año si es que se quieren compensar sus impactos ambientales.

Life Cycle Assessment for Three Types of Grocery Bags - Recyclable Plastic; Compostable, Biodegradable Plastic; and Recycled, Recyclable Paper [29]

Realizado por Bousted Consulting & Associates (BCAL), corresponde a un análisis de ciclo de vida en tres tipos de bolsas de supermercado: bolsa tradicional de polietileno, bolsa hecha de plásticos compostables (65 % EcoFlex, 25 % carbonato de calcio y 10 % ácido poliláctico) y una bolsa de papel hecha con al menos 30 % de fibras recicladas. El estudio se realizó en las etapas de manufactura, distribución y desecho de las bolsas, utilizando un software propio y que dio resultados de energía utilizada, uso de materia prima, uso de agua, emisiones al aire, efluencias de agua y desechos sólidos.

Dada las características de las bolsas, BCAL efectuó sus cálculos bajo el supuesto que una bolsa de papel tiene una capacidad de 1,5 veces la que tiene una bolsa de polietileno o una compostable y decidió que su unidad funcional es la capacidad de carga igual a 1000 bolsas de papel. En la Tabla 2.2, se muestra un resumen de los impactos obtenidos.

Tabla 2.2: LCA de tres tipos de bolsas de supermercado realizado por BCAL.

	Papel (30 % de fibra reciclada)	Plástico Compostable	Polietileno
Total energía utilizada (MJ)	2622	2070	763
Uso de combustible fósil (kg)	23,2	41,5	14,9
Desecho municipales sólidos (kg)	33,9	19,2	7,0
Emisión de gases de efecto invernadero (Ton de CO ₂ eq)	0,08	0,18	0,04
Uso de agua fresca (galón)	1004	1017	58

El estudio concluye que las bolsas de polietileno producen menor cantidad de desechos y gases de efecto invernadero y utilizan menor energía y agua que las otras dos bolsas. Así mismo, las bolsas compostables utilizan más combustibles fósiles y agua; sin embargo, el estudio considera que las bolsas compostables tienen su fin de ciclo de vida como desecho municipal y no en compostaje industrial, por lo que, los posibles efectos positivos de esta bolsa no son considerados.

LCA of shopping bag alternatives [30]

Estudio realizado por la consultora Hyder para Zero Waste Australia, cuyo ACV tiene como unidad funcional: "la cantidad de bolsas utilizadas por un hogar para cargar 70 artículos desde el supermercado a la casa, cada semana por un año". Esto fue calculado para 8 tipos de bolsas, en las que se encuentran bolsas de PEAD y papel Kraft hechas al 100% con material reciclado.

Las categorías de impacto corresponden a consumo de material, cambio climático (emisión de CO₂, metano y otros gases de efecto invernadero), consumo de energía y uso de agua. Cada categoría posee una clasificación de 1 a 5, donde uno corresponde al menor impacto. El estudio incluye además un impacto de basura marina, donde las bolsas hechas de PEAD y PEBD obtienen una clasificación de 5, sin embargo, estas bolsas poseen los menores impactos (igual a 1) en uso de agua. Las bolsas de papel kraft obtienen la máxima clasificación de impacto en cuanto a consumo de material, cambio climático y uso de energía. Otra conclusión importante es que, si bien las bolsas de PEAD vírgenes o con material reciclado tienen el mismo impacto de consumo de material, las bolsas recicladas poseen menor impacto en cambio climático y consumo de energía en comparación a las vírgenes. Así mismo, las bolsas compostables obtienen una clasificación de 4 en consumo de material, mientras que en las otras categorías obtienen valores de 2 o 3. Finalmente, las bolsas reutilizables de PP con o sin material

reciclado obtienen clasificación mínima en todas las categorías, excepto en la categoría de basura marina donde obtienen un 2.

Como conclusión, el estudio indica que los hogares incurrirían en ahorros importantes en materias ambientales si cambiaran las bolsas 'de un solo uso' por bolsas reutilizables; se ahorran 8 toneladas de basura marina, 12 millones de MJ en uso de energía y 4.224 toneladas en emisiones de gases de efecto invernadero por familia al año en Australia.

Capítulo 3

Metodología

La metodología para realizar un análisis de ciclo de vida se basa en la definición de la norma ISO 14040 e ISO 14044.

3.1. Definición de los objetivos y alcances

3.1.1. Objetivos del estudio

El objetivo de este estudio es calcular el impacto ambiental de la fabricación de bolsas de supermercado en Chile, a través de un análisis de ciclo de vida, y analizar cómo influye la manufactura de este producto en estas cifras.

3.1.2. Alcances del estudio

Las bolsas escogidas para el análisis corresponden a:

1. Bolsa de un solo uso hecha de PEAD
2. Bolsa de un solo uso hecha de PEAD con aditivos oxodegradantes
3. Bolsa de un solo uso hecha de PEBD
4. Bolsa de un solo uso hecha de polímeros compostables
5. Bolsa reutilizable hecha de PP no tejido

Estas fueron escogidas a partir de la revisión bibliográfica realizada, donde se da cuenta que estos son los principales tipos de bolsas utilizadas alrededor del mundo.

El ACV se realizará mediante el software OpenLCA 1.8 y se utilizará las base de datos de Ecoinvent v3 para definir el inventario.

Función, unidad funcional y flujo de referencia

La función primaria de las bolsas de supermercado consiste en el empaque de productos para transportarlos desde el supermercado hasta el lugar donde serán consumidos. Como función secundaria, las bolsas catalogadas como de un solo uso pueden utilizarse como bolsas de basura doméstica. Esto no implica que se consideren *reutilizables*, dado estarían cumpliendo una labor distinta.

La unidad funcional del sistema se define como: “ayudar en el transporte de 2.843 litros de productos adquiridos, desde un supermercado hasta un hogar durante un año”. Esto se definió en base al estudio realizado por el MMA, donde explicitan que se han dejado de producir 2.200 millones de bolsas a un año de la entrada en vigencia de la ley [8], lo que equivale aproximadamente a 130 bolsas por persona al año. Considerando que las bolsas de PEAD tienen una capacidad volumétrica de 19,1 litros, se ha determinado que las personas transportan 2843 litros de mercadería al año. De esta forma, se puede cuantificar el impacto ambiental de reemplazar las bolsas convencionales de PEAD.

En la tabla 3.1, se definen las características de las bolsas estudiadas, para poder definir sus respectivos flujos de referencia considerando un solo uso de cada bolsa.

Tabla 3.1: Características de las bolsas estudiadas en el ACV

Tipos de bolsas	Dimensiones [cm ²]	Capacidad Volumétrica [litros]	Cantidad Unidad Funcional
COMPOSTABLE	42x50	19,1	130
PEAD	40x50	19,1	130
PEAD OXODEGRADABLE	40x50	19,1	130
PEBD	40x50	21,5	115
PP	40x43	22,5	110

Límites del sistema

Se considera que el estudio posee un enfoque “de la cuna a la tumba”, por lo que analiza desde la extracción de materias primas hasta el desecho del producto.

En la imagen 3.1 se muestran los límites considerados en el ACV. Este comienza con la fabricación de la materia prima, correspondiente a pellet vírgen o reciclado. Dado que son fabricados en el exterior, se considera el transporte marítimo y terrestre de traer el pellet a una fábrica en Santiago, donde posteriormente ocurre la manufactura de las bolsas. Sin embargo, no se considera el despacho de las bolsas hacia los supermercados, ni el transporte que el cliente realiza con las bolsas hacia su hogar, debido a que existen muchas localidades que considerar como destino. Finalmente, se considera que las bolsas van a vertederos municipales como desechos, mas no se incluye el transporte realizado por los camiones de basura.

Tampoco se incluyen aquellas etapas en las cuales adquirir los datos necesarios es difícil o bien se considera que su impacto es nulo en comparación a otros procesos. Estas etapas corresponden a:

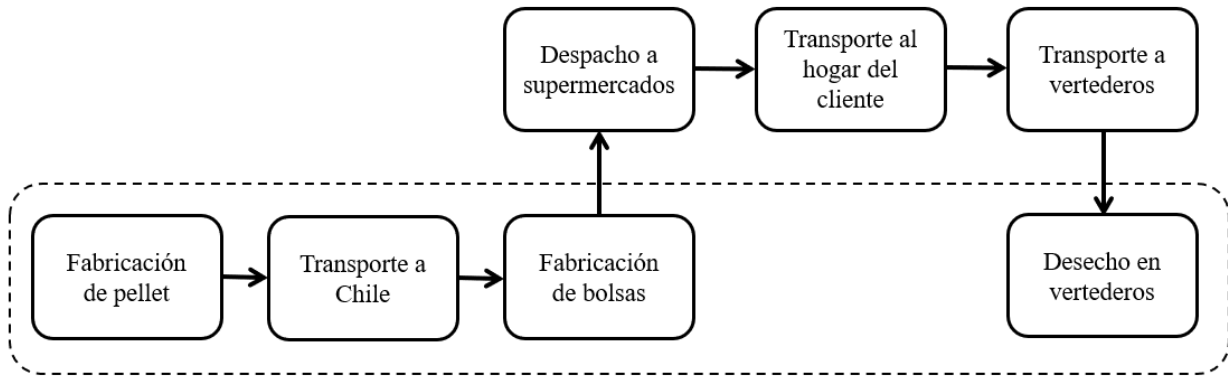


Figura 3.1: Límites del sistema

- Producción, mantención y desmantelamiento de equipos y maquinaria utilizada
- Packaging de las bolsas
- Procesos de reciclaje. Los materiales reciclados siguen la regla de un “cut-off”, donde estos materiales llevan el impacto de los procesos de reciclaje desde su base de datos, por lo que, no es necesario incluirlos.

Alcance geográfico

Según datos del CENEM los principales importadores de polietileno se encuentran en Corea del Sur, Estados Unidos y Brasil; para efectos de este estudio se considera que la fabricación de pellet ocurre en Corea del Sur. Para las bolsas compostables se considera que provienen de Italia, donde se ubica el producto de Mater-Bi. Luego, el pellet se transporta de forma marítima hasta el puerto de San Antonio, donde luego se utiliza transporte terrestre para llegar a Santiago. El resto de las etapas son llevadas a cabo en Santiago de Chile.

3.2. Inventario del ciclo de vida

El análisis de inventario implica la recopilación de los datos y procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas propias del sistema.

3.2.1. Recopilación de datos

A continuación se nombran los datos a considerar para cada etapa del ACV.

Producción de pellet

Dado que no existe una norma que establezca la composición de las bolsas plásticas en Chile, se decide tomar los datos de ACV realizados anteriormente; en particular se utiliza la composición del estudio realizado en el Reino Unido por la Environment Agency.

Además de polietileno de alta y baja densidad, las bolsas se fabrican de otros compuestos para mejorar sus propiedades:

1. Polietileno de baja densidad lineal (PEBDL): sirve para mejorar la resistencia a la tracción de las bolsas y les permite mayor flexibilidad.
2. Óxido de titanio (TiO_2): protege a la bolsa de rayos ultravioleta, conservando el color de la bolsa.
3. Tiza: considerada en este ACV como carbonato de calcio ($CaCO_3$), mejora la conductividad térmica de los polímeros extruidos, logrando así que el polímero se caliente y enfríe más rápido.

A continuación, se presentan los compuestos de cada bolsa de forma unitaria y de sus respectivos flujos de referencia (UF).

Para el caso de la bolsa compostable, se considera que está compuesta de un 50 % de almidón de maíz y otro 50 % de policaprolactona (PCL) como se indica en la tabla 3.2

Tabla 3.2: Compuestos de las bolsa compostable de un solo uso.

Compuestos	Cantidad unitaria [g]	Cantidad UF [g]
Almidón de maíz	8,04	1045,2
PCL	8,04	1045,2
Óxido de Titanio	0,33	42,9
TOTAL	16,41	2.133,30

En tanto, las siguientes tablas muestran las especificaciones de los componentes de las bolsas de PEAD, PEAD con aditivos oxodegradables, PEBD y PP.

Tabla 3.3: Compuestos de las bolsas de un solo uso de PEAD

Compuestos	Cantidad unitaria [g]	Cantidad UF [g]
PEAD	6,9	791,7
PEBDL	0,89	115,7
Óxido de Titanio	0,16	20,8
Tiza	0,81	105,3
TOTAL	7,95	1.033,5

Tabla 3.4: Compuestos de las bolsas de un solo uso de PEAD con aditivos oxodegradables

Compuestos	Cantidad unitaria [g]	Cantidad UF [g]
PEAD	6,45	838,5
PEBD	0,83	107,9
PEBDL	0,5	65
Óxido de Titanio	0,17	22,1
Tiza	0,25	32,5
Prodegradante	0,002	0,26
TOTAL	8,20	1.066,26

Tabla 3.5: Compuesto de las bolsas de un solo uso de PEBD.

Compuestos	Cantidad unitaria [g]	Cantidad UF [g]
PEBD	32,85	3790,27
PEBDL	0,7	80,77
Óxido de Titanio	1,05	121,15
TOTAL	34,6	3.992,18

Tabla 3.6: Compuestos de las bolsas reutilizables de PP no tejido.

Compuesto	Cantidad unitaria [g]	Cantidad UF [g]
PP	115,83	12.782,48
TOTAL	115,83	12.782,48

Transporte a Chile

Se considera que los pellet necesarios para fabricar las bolsas de PEAD, PEBD y PP provienen de Corea del Sur, a través de una ruta marítima de 18.849 km hasta el puerto de San Antonio. En el caso de los pellet para bolsas compostables, se consideran como Mater-Bi, cuya fabricación de origen es Italia, por lo que, son trasladados por una ruta marítima de 11.836 km hasta el puerto de San Antonio. Finalmente, son trasladados 110 km a Santiago por un camión carga.

Fabricación de bolsas

Como se menciona en la sección 2.5, la fabricación de las bolsas tipo camiseta consta de 4 etapas. Se selecciona la maquinaria necesaria para cada etapa y a través de su ficha técnica se calcula la energía que utilizan para fabricar el flujo de referencia.

A continuación, se nombran la maquinaria para cada etapa y los aspectos técnicos considerados en el ACV. En la etapa de extrusión se consideran dos tipos de máquinas, extrusora

monotornillo y doble tornillo, para ver cómo influyen en el ACV. La fabricación de las bolsas de PP no tejido no cuentan con extrusora doble tornillo, por lo que no se consideran en ese análisis.

En primer lugar, la tabla 3.7 muestra las especificaciones técnicas de la maquinaria utilizada en la fabricación de las bolsas de PEAD, PEAD con aditivos oxodegradables, PEBD y compostables. Estos datos fueron escogidos desde el catálogo de YunFeng Machinery [31].

Tabla 3.7: Especificaciones técnicas de la maquinaria considerada para las bolsas de PEAD, PEBD y compostables.

Máquina extrusora	
Ancho máximo [mm]	600
Máxima carga de salida [kg/hr]	35
Potencia motor [kW]	11
Extrusora doble tornillo	
Ancho máximo [mm]	600
Máxima carga de salida [kg/hr]	60
Potencia motor [kW]	35
Máquina soplado	
Ancho máximo [mm]	600
Carga máxima de salida [kg/hr]	30
Potencia motor [kW]	15
Máquina impresora	
Ancho máximo [mm]	600
Velocidad impresión [m/min]	80
Potencia motor [kW]	5,3
Máquina de sellado y corte	
Ancho máximo [mm]	600
Velocidad de corte [m/min]	120
Potencia motor [kW]	3,5

Mientras la tabla 3.8 indica las especificaciones técnicas de la maquinaria utilizada para la fabricación de las bolsas de PP, en base a lo estudiado en la sección 2.6, cuyos datos fueron escogidos desde el catálogo de Zhejiang Zhengxin Machinery [32].

Tabla 3.8: Especificaciones técnicas de la maquinaria considerada para las bolsas de PP no tejido.

Máquina extrusora	
Ancho máximo [mm]	600
Carga máxima de salida [kg/hr]	35
Potencia motor [kW]	11
Máquina de tejido	
Ancho máximo [mm]	600
Carga máxima de salida [kg/hr]	30
Potencia motor [kW]	15
Máquina impresora	
Ancho máximo [mm]	600
Velocidad impresión [m/min]	80
Potencia motor [kW]	5,3
Máquina de sellado y corte	
Ancho máximo [mm]	600
Velocidad de corte [m/min]	120
Potencia motor [kW]	3,5

Desecho en vertederos

En base a lo indicado en los antecedentes, este estudio considera que el 95 % de las bolsas fabricadas terminan en vertederos luego de ser utilizadas como empaque.

En la tabla 3.9, se nombra la cantidad de desechos que llegan a los vertederos, en base a la unidad funcional mencionada anteriormente.

Tabla 3.9: Peso de las bolsas desechadas a vertederos.

Tipo de bolsa	Bolsas totales [unidad]	Bolsas recicladas [unidad]	Peso en vertedero [kg]
COMPOSTABLE	130	0	2,133
PEAD	130	4	1,002
PEAD OXODEGRADABLE	130	4	1,034
PEBD	115	3	3,888
PP	110	3	12,435

3.2.2. Cálculo de datos

Fabricación de bolsas

Para el cálculo de consumo en maquinaria se utiliza la ecuación 3.1, donde los valores requeridos fueron obtenidos en la sección anterior.

$$\text{Consumo energético [kWh]} = \text{Potencia Máquina [kW]} * \text{Horas de Uso [hra]} \quad (3.1)$$

Para el cálculo de las horas de uso, se considera el máximo output que entrega cada máquina y se calcula cuántas horas es utilizada fabricando el flujo de referencia.

En el caso de las bolsas de PEAD, la máquina extrusora tiene una salida máxima de 35, [kg/hr] y para las 130 bolsas se utilizan 1,0335 kg de pellet, lo que nos da 0,0295 horas de uso. Con la potencia máxima de 11 kW, nos da un consumo de 0,3248 kWh, lo que equivale a 1,1693 MJ.

Este procedimiento se utiliza para el resto de las máquinas y se detalla en la Tabla 3.10 . Para este tipo de bolsas se incluyen la energía consumida por extrusoras monotornillo y doble tornillo, con el fin de compararlas.

Tabla 3.10: Energía consumida para fabricar las bolsas de PEAD

Tipo de máquina	Horas de uso [hra]	Potencia usada [kWh]	Potencia Usada [MJ]
Extrusora monotornillo	0,0295	0,3248	1,1693
Extrusora doblatornillo	0,0172	0,6029	2,1703
Soplado	0,0345	0,5168	1,8603
Impresora	0,0135	0,0718	0,2584
Máquina sellado y corte	0,0090	0,0316	0,1137
Total monotornillo			3,4018
Total doble tornillo			4,4028

El detalle de los valores obtenidos para el resto de las bolsas se encuentran en el Apéndice A.

Finalmente, en la tabla 3.11 se indican los valores de energía consumida para todos los tipos de bolsas, incluyendo los valores obtenidos para los casos con extrusora monotornillo y doble tornillo.

Tabla 3.11: Total energía consumida para cada tipo de bolsa.

Tipo de bolsa	Consumo [MJ]	
	Monotornillo	Doble tornillo
COMPOSTABLE	28,58	30,65
PEAD	25,36	26,36
PEAD OXO	25,45	26,49
PEBD	34,03	37,90
PP	9,99	-

3.3. Evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida (EICV)

La EICV contempla la clasificación y caracterización dada por el software OpenLCA 1.8, sin considerar el agrupamiento, ni la ponderación.

Los impactos ambientales se obtienen a partir del método CML2001 y son caracterizados a través de los siguientes indicadores:

- Potencial de Cambio Climático
- Agotamiento de Recursos Abióticos - combustibles fósiles
- Ecotoxicidad Marina

Los resultados se calculan a partir de los consumos de materia prima, combustible fósil para el transporte, energía eléctrica para la fabricación y desechos descritos en el ICV.

Capítulo 4

Resultados y Análisis

En esta sección se muestran los resultados obtenidos por la Evaluación de Impacto Ambiental, a partir del software OpenLCA. En primera instancia, se muestran los resultados generales para los 5 tipos de bolsas plásticas y luego se hace un desglose de los resultados adquiridos por cada etapa. A continuación, se exhiben los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad y el Potencial de Desperdicios calculado a partir de la sección 2.7. Finalmente, se realiza un análisis cuantitativo de los resultados expuestos.

4.1. Resultados del EICV

4.1.1. Resultados generales

En la tabla 4.1 se indican los valores conseguidos para los distintos índices a partir del EICV.

Tabla 4.1: Resultados del EICV para los 5 tipos de bolsas estudiadas.

Tipo de bolsa	Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DBeq]	Agotamiento de recursos fósiles [MJ]	Cambio climático GWP100 [kg CO ₂ eq]
COMPOST	2.499,13	23,38	2,28
PEAD	1.149,83	14,37	0,95
PEAD OXO	1.178,68	15,07	0,98
PEBD	4.122,69	54,57	3,55
PP	4.911,54	131,61	7,04

A partir de los resultados presentados, la bolsa que posee mayor impacto en las tres categorías corresponde a las hechas de PP. Mientras que las bolsas de PEAD y PEAD con aditivos oxodegradables son las que menos impactos poseen, lo que concuerda con estudios realizados con anterioridad.

A continuación, se muestra un gráfico comparativo para cada índice. La figura 4.1 muestra la ecotoxicidad marina obtenida para los 5 tipos de bolsas. Cabe destacar que las bolsas de PEBD analizadas utilizan casi 4 kilogramos de compuestos poliméricos, mientras que las de PP, alrededor de 13 kilogramos; sin embargo, la cantidad de emisiones de 1,4-DBeq de ambas bolsas no están muy alejadas. Por cada kilogramo de bolsas de PEBD fabricadas se emiten más de 1.000 kilogramos de 1,4-DBeq, mientras que por cada kilogramo de bolsas de PP fabricadas, se emiten cerca de 380 kilogramos de 1,4-DBeq. Asimismo, las bolsas de PEAD, PEAD oxodegradable, emiten cerca de 1.000 kg de 1,4-DBeq por kilogramo fabricado, mientras que las bolsas compostables generan cerca de 1.100 kg. Por lo que, las bolsas de PP serían las menos tóxicas al ambiente marino, mientras que las bolsas compostables son las que más contaminan.

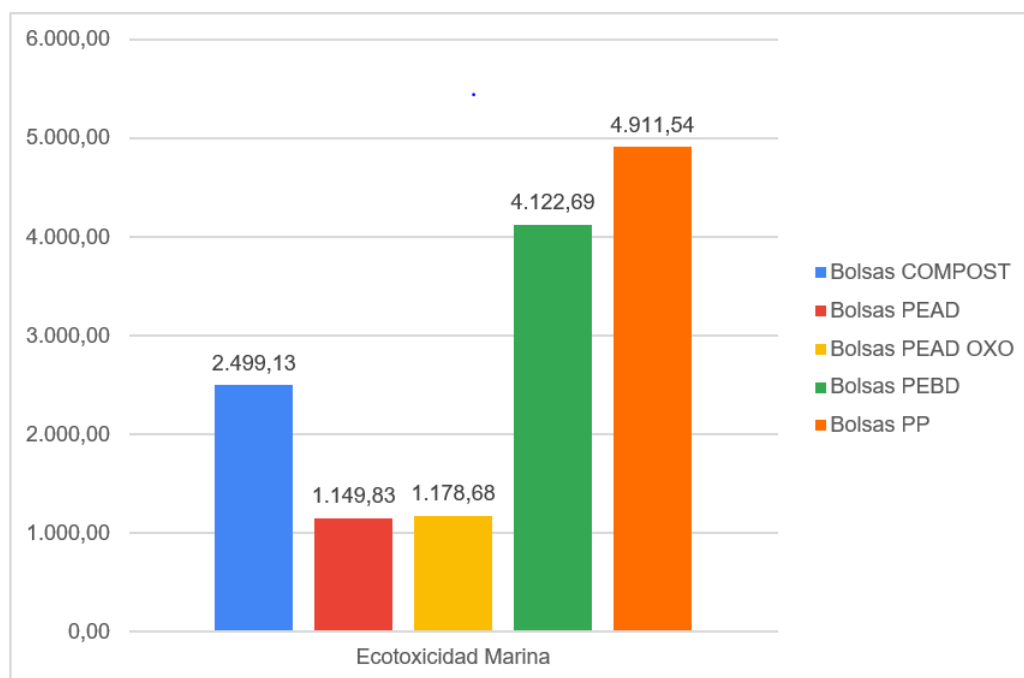


Figura 4.1: Ecotoxicidad marina para los 5 tipos de bolsas en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente

En seguida, la figura 4.2 expone una comparación entre el agotamiento de recursos fósiles obtenido para las bolsas plásticas. Nuevamente, se observa que las bolsas de PP son las que poseen un mayor consumo de recursos fósiles, mientras que la de PEAD es la que posee menos. Sin embargo, al calcular la cantidad de MJ consumidos por kilogramos, se concluye que las bolsas de PP y compostables consumen cerca de 10 MJ por kilogramos, mientras que las de PEAD, PEAD oxodegradable y PEBD consumen cerca de 14 MJ.

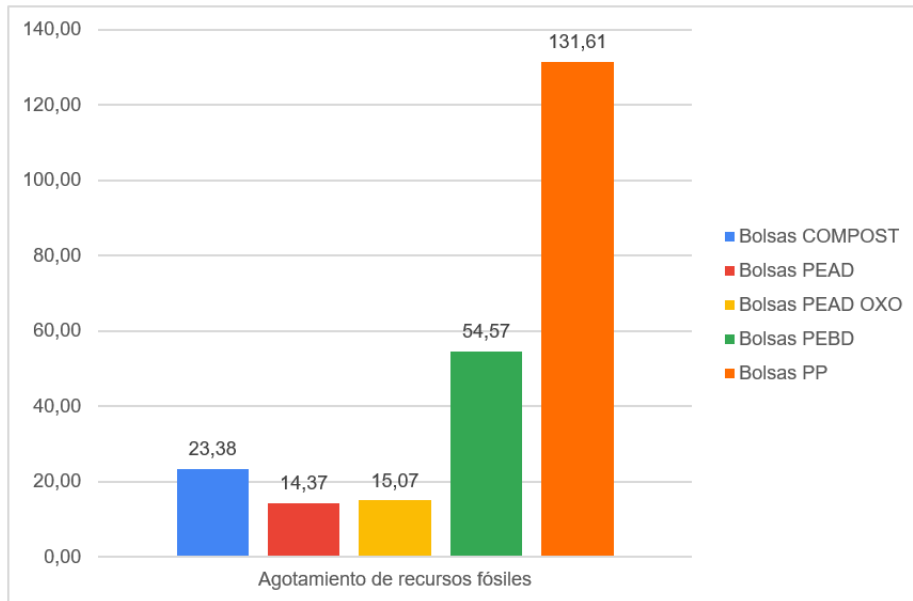


Figura 4.2: Agotamiento de recursos fósiles para los 5 tipos de bolsas en MJ.

Finalmente, la figura 4.3 muestra el índice de cambio climático GWP100 que producen los 5 tipos de bolsas plásticas estudiadas. Comparando la cantidad de kilogramos de CO₂ emitidos para cada bolsa, se calcula que las bolsas de PEAD, PEAD oxodegradables y PEBD emiten cerca de 0,9 kg de CO₂eq por kilogramo fabricado, mientras que las bolsas compostables emiten 1,06 kg de CO₂eq y las de PP, 0,55 kg. Esto nos indica nuevamente que las bolsas de PP son las menos contaminantes.

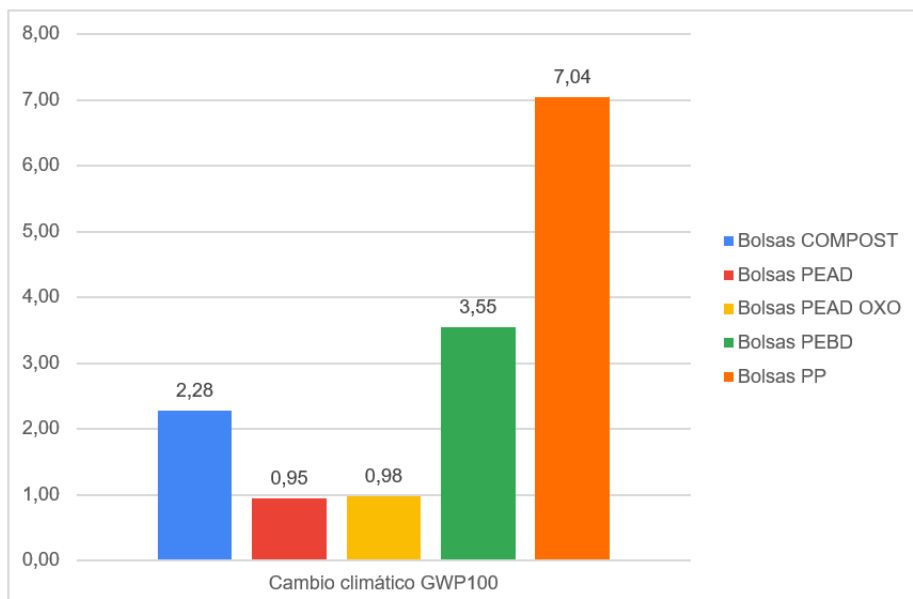


Figura 4.3: Índice de cambio climático GWP100 para los 5 tipos de bolsa en kg de CO₂ equivalente.

4.1.2. Resultados por etapa

En esta sección, se muestran los resultados obtenidos por cada una de las etapas del ciclo de vida de las bolsas: producción de pellet, transporte de pellet, producción de las bolsas y su posterior desecho.

Para la ecotoxicidad marina, los resultados de todas las bolsas se expresan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Ecotoxicidad marina de cada etapa en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente

	Producción Pellet	Transporte Pellet	Produccion Bolsas	Desecho Bolsas	Total
Bolsas COMPOST	261,645	170,448	1.956,273	110,769	2.499,135
Bolsas PEAD	39,327	105,929	1.003,217	1,356	1.149,829
Bolsas PEAD OXO	22,762	109,287	1.032,723	1,404	1.166,176
PEBD	146,866	409,163	3561,420	5,240	4.122,689
Bolsas PP	220,645	1.495,883	2.947,688	247,0	4.911,540

A continuación, se separan los resultados para cada bolsa y se expresan en los siguientes gráficos. En la figura 4.4 se grafican los resultados por etapas de las bolsas compostables.

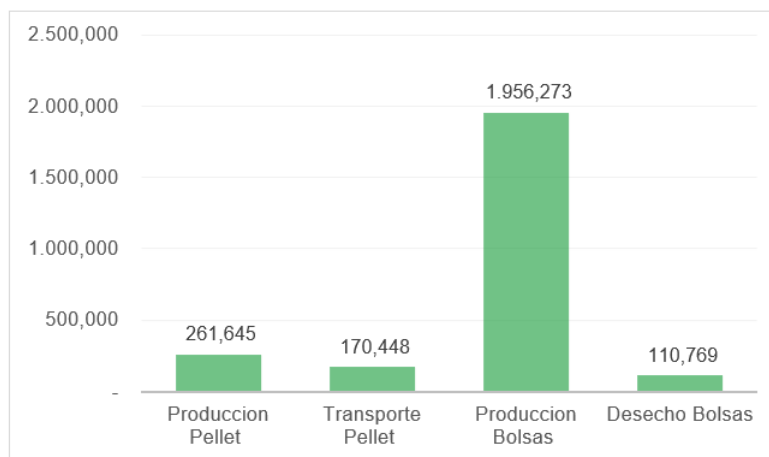


Figura 4.4: Ecotoxicidad marina por etapas para las bolsas compostables en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente.

La figura 4.5 muestra los resultados por etapa obtenidos de las bolsas de polietileno de alta densidad.

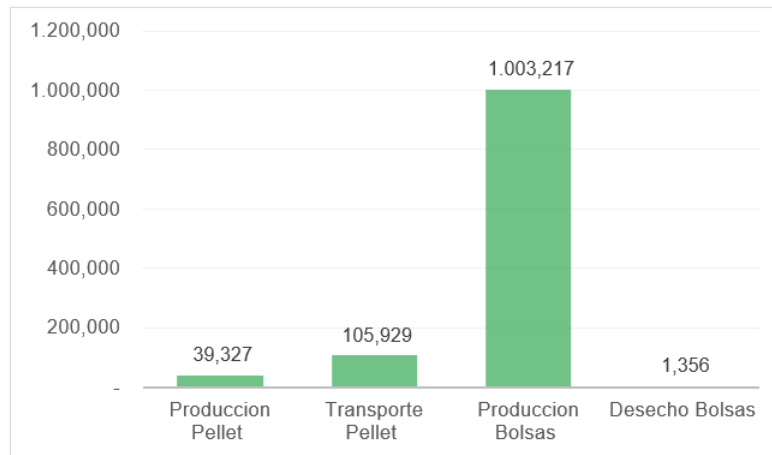


Figura 4.5: Ecotoxicidad marina por etapas para las bolsas de PEAD en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente.

En la figura 4.6 se expone la ecotoxicidad marina obtenida por etapas de las bolsas de polietileno de alta densidad con aditivos oxodegradables.

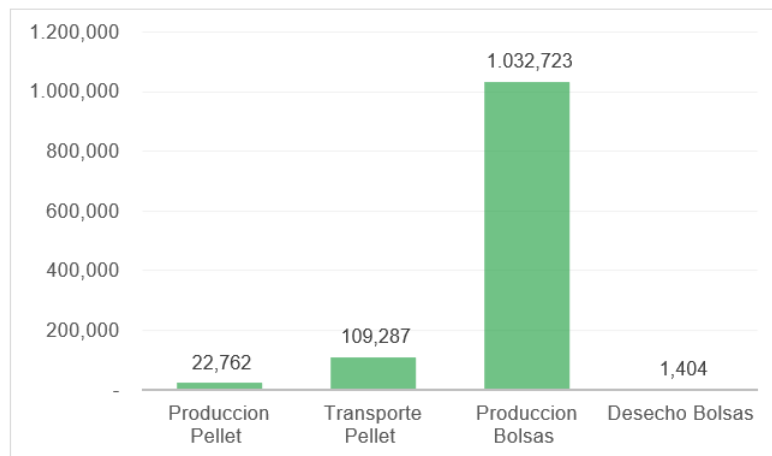


Figura 4.6: Ecotoxicidad marina por etapas para las bolsas de PEAD oxodegradable en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente.

En la figura 4.7 se muestra la ecotoxicidad marina por etapas de las bolsas de polietileno de baja densidad.

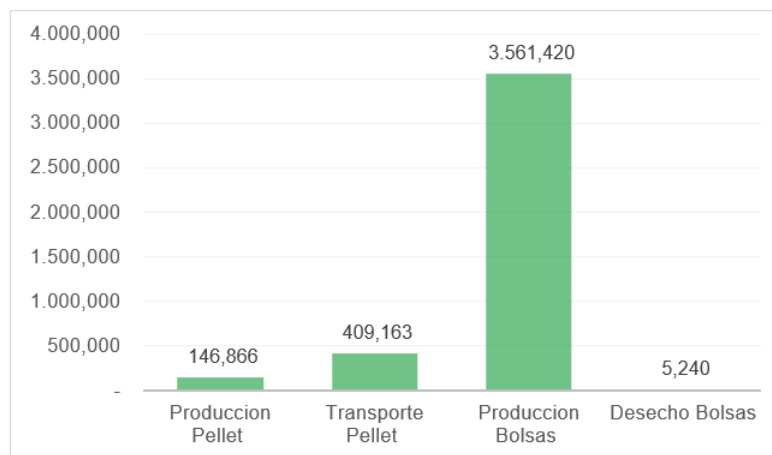


Figura 4.7: Ecotoxicidad marina por etapas para las bolsas de PEBD en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente.

Finalmente, en la figura 4.8 se exhiben los resultados obtenidos por etapa de las bolsas de polipropileno.

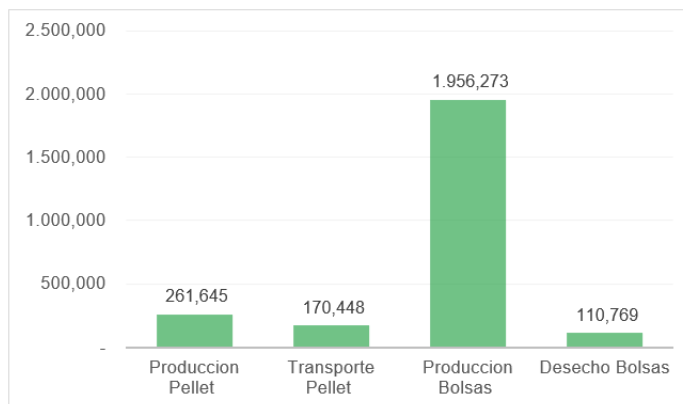


Figura 4.8: Ecotoxicidad marina por etapas para las bolsas de PP en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente.

El mayor contribuyente de este tipo de contaminación corresponde a la producción de las bolsas. Esto es debido a que los principales productos ecotóxicos son metales pesados y, dado que la energía en Chile se produce mayoritariamente por termoeléctricas e hidroeléctricas, se liberan muchas de estas sustancias a los ecosistemas generando altos niveles de contaminación al utilizar grandes cantidades de energía eléctrica. En el caso de las bolsas de PP, un gran contribuyente de este impacto también lo es el transporte de pellet. Esto es debido a que en esta etapa se considera el peso transportado y, a pesar de provenir del mismo lugar que el pellet de PEAD y PEBD, se trasladan 11 kilogramos más que en el resto de las bolsas. Por último, las bolsas compostables tienen como segundo contribuyente de este impacto la producción de pellet, lo que puede deberse al uso de agua y suelo para la producción de los biopolímeros basados en maíz.

A continuación, la tabla 4.3 muestra el agotamiento de recursos fósiles obtenidos por los 5 tipos de bolsas.

Tabla 4.3: Agotamiento de recursos fósiles contribuidos por cada etapa en MJ.

	Produccion Pellet	Transporte Pellet	Produccion Bolsas	Desecho Bolsas	TOTAL
Bolsas COMPOST	3,576	5,342	13,337	1,129	23,384
Bolsas PEAD	4,092	3,298	6,840	0,490	14,720
Bolsas PEAD OXO	4,482	3,402	7,041	0,142	15,067
Bolsas PEBD	17,021	12,738	24,281	0,531	54,571
Bolsas PP	62,187	46,570	20,097	2,750	131,604

La figura 4.9 muestra el agotamiento de recursos fósiles calculado por etapas para las bolsas compostables.

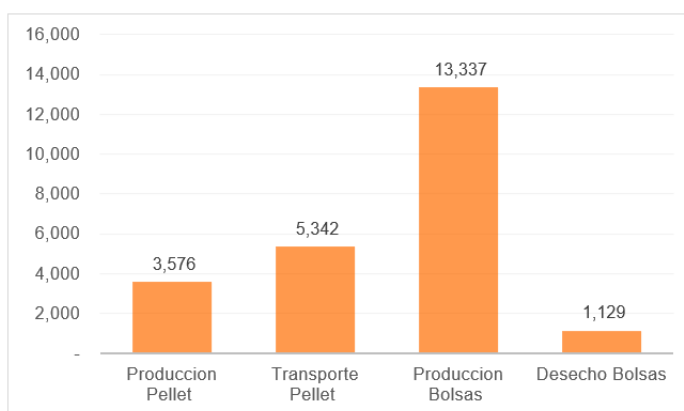


Figura 4.9: Agotamiento de recursos fósiles por etapas para las bolsas compostables en MJ.

En la figura 4.10 muestra el agotamiento de recursos fósiles calculado por etapas para las bolsas de polietileno de alta densidad.

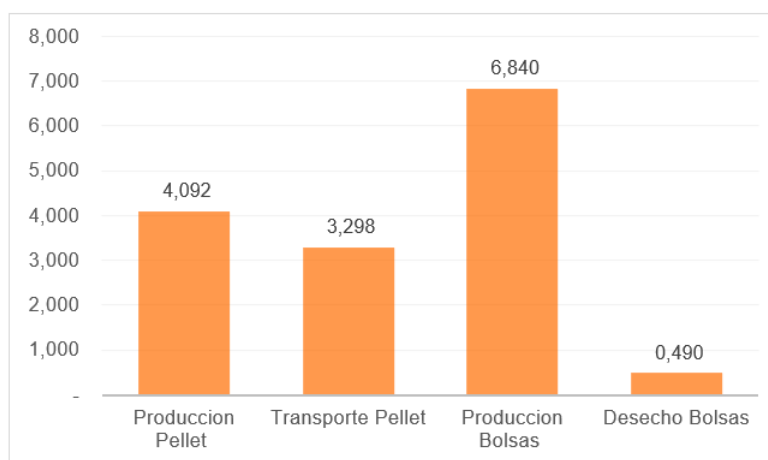


Figura 4.10: Agotamiento de recursos fósiles por etapas para las bolsas de PEAD en MJ.

La figura 4.11 muestra el agotamiento de recursos fósiles calculado por etapas para las bolsas de polietileno de alta densidad con aditivos oxo-degradables.

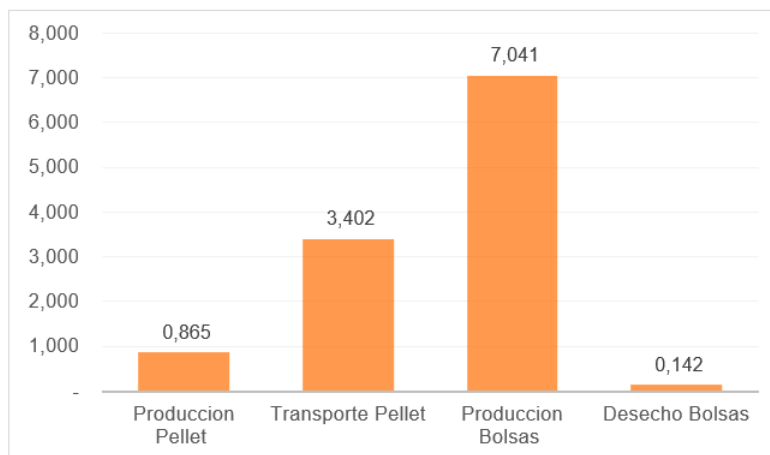


Figura 4.11: Agotamiento de recursos fósiles por etapas para las bolsas de PEAD oxodegradable en MJ.

La figura 4.12 muestra el agotamiento de recursos fósiles calculado por etapas para las bolsas de polietileno de baja densidad.

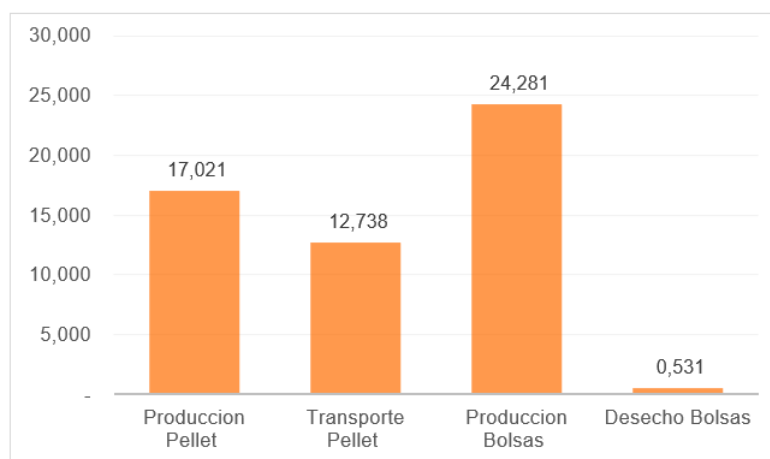


Figura 4.12: Agotamiento de recursos fósiles por etapas para las bolsas de PEBD en MJ.

Finalmente, la figura 4.9 muestra el agotamiento de recursos fósiles calculado por etapas para las bolsas de polipropileno.

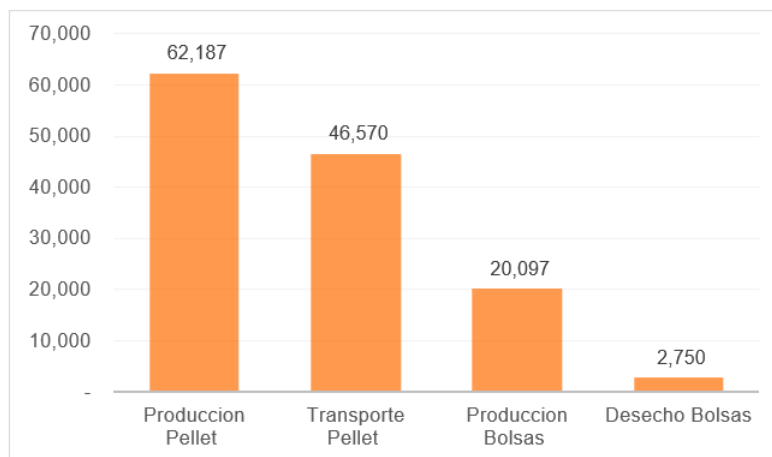


Figura 4.13: Agotamiento de recursos fósiles por etapas para las bolsas de PP en MJ.

Para el agotamiento de recursos fósiles, nuevamente la producción de las bolsas corresponde al mayor contribuyente debido al uso de energía eléctrica en base a carbón y gas natural. La excepción corresponde a las bolsas de PP, donde el mayor contribuyente es la producción de pellet; esto debido nuevamente al peso, ya que se requieren poco más de 14 kgs para satisfacer la unidad funcional, mientras que para los otros tipos de bolsa el pellet no sobrepasa los 3 kgs. Cabe destacar que el transporte, a diferencia de la ecotoxicidad, contribuye en mayor manera al agotamiento de recursos, debido a que se considera el petróleo necesario para llevar el pellet tanto en barco, como en tierra.

En seguida, la tabla 4.4 muestra el índice de cambio climático GWP100 obtenido por etapa de los 5 tipos de bolsas.

Tabla 4.4: Índice de cambio climático GWP100 en kg de CO₂

	Produccion Pellet	Transporte Pellet	Produccion Bolsas	Desecho Bolsas	TOTAL
Bolsas COMPOST	0,015	0,387	1,107	0,773	2,282
Bolsas PEAD	0,137	0,239	0,568	0,014	0,958
Bolsas PEAD OXO	0,037	0,247	0,585	0,004	0,873
Bolsas PEBD	0,590	0,924	2,016	0,016	3,546
Bolsas PP	1,885	3,376	1,669	0,112	7,042

Luego, la figura 4.14 muestra el índice de cambio climático por etapa para las bolsas compostables.

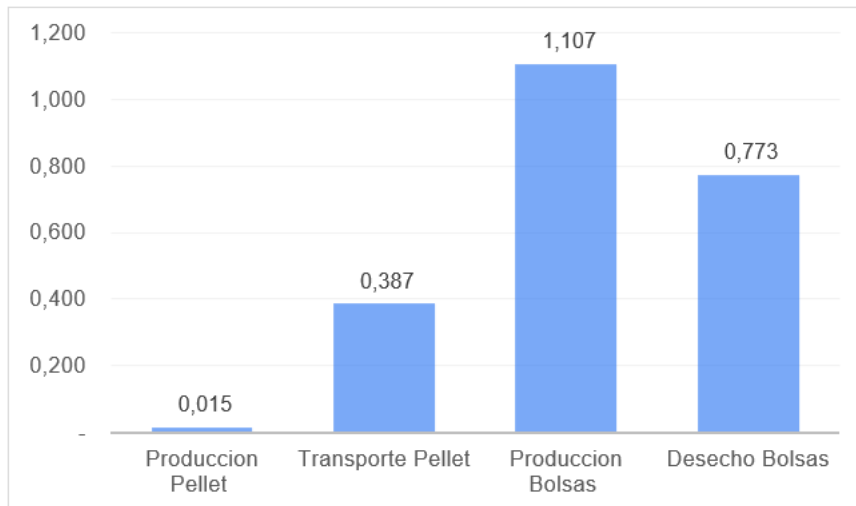


Figura 4.14: Índice de cambio climático GWP100 por etapas para las bolsas compostables en kg de CO2 equivalente.

La figura 4.15 exhibe el índice de cambio climático por etapa para las bolsas de polietileno de alta densidad.

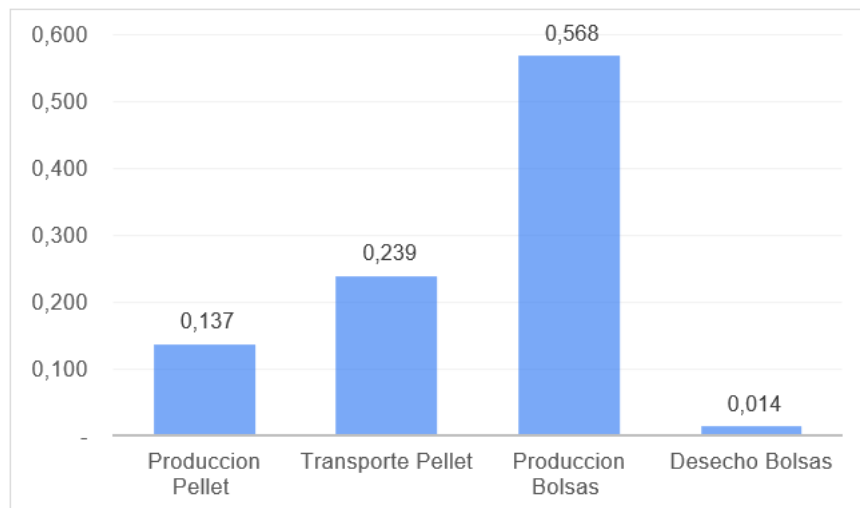


Figura 4.15: Índice de cambio climático GWP100 por etapas para las bolsas de PEAD en kg de CO2 equivalente.

La figura 4.16 muestra el índice de cambio climático por etapa para las bolsas de polietileno de alta densidad con aditivos oxo-degradables.

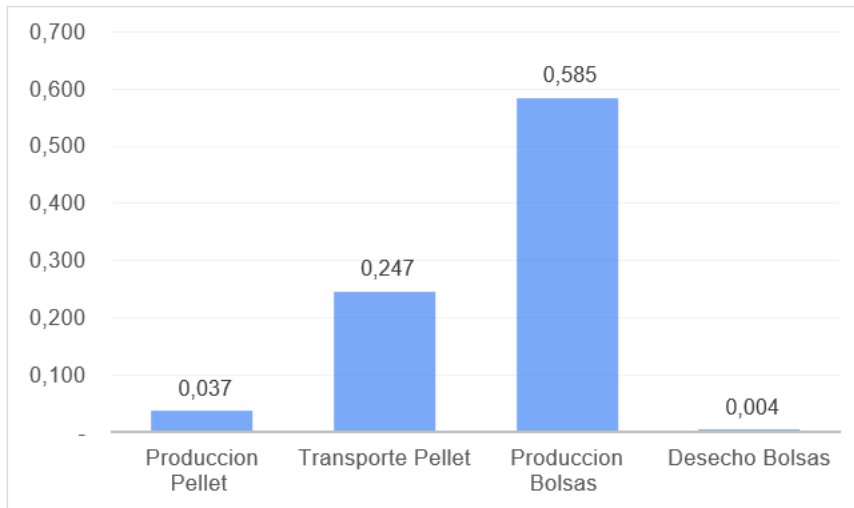


Figura 4.16: Índice de cambio climático GWP100 por etapas para las bolsas de PEAD oxo-degradable en kg de CO2 equivalente.

En la figura 4.17 se muestra el índice de cambio climático por etapa para las bolsas de polietileno de baja densidad.

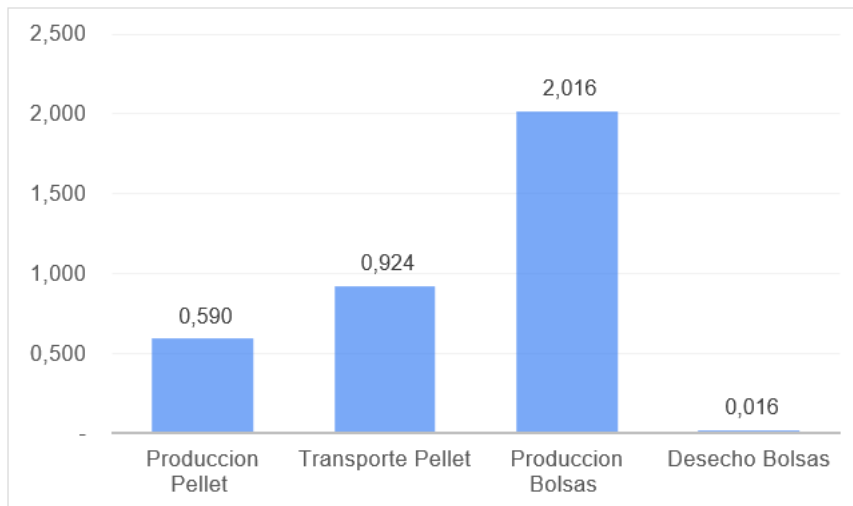


Figura 4.17: Índice de cambio climático GWP100 por etapas para las bolsas de PEBD en kg de CO2 equivalente.

Finalmente, la figura 4.18 exhibe el índice de cambio climático por etapa para las bolsas de polipropileno.

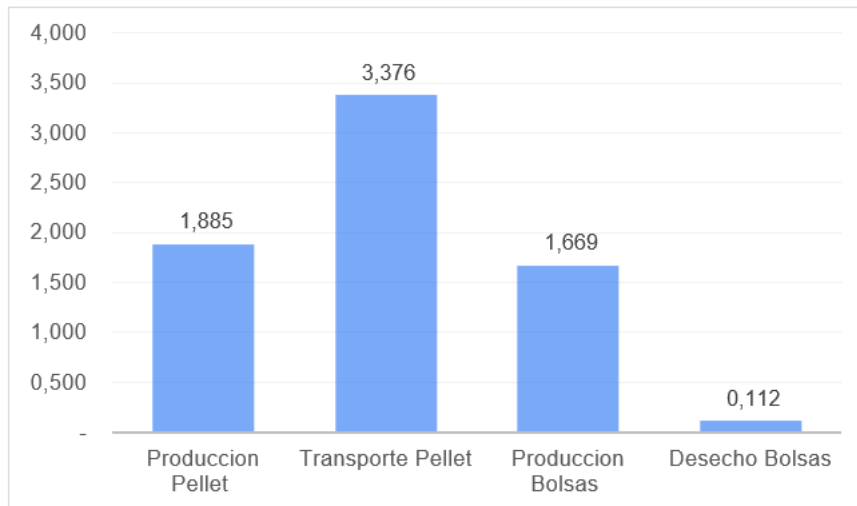


Figura 4.18: Índice de cambio climático GWP100 por etapas para las bolsas de PP en kg de CO2 equivalente.

En cuanto al ICC, una vez más la producción de bolsas es el mayor contribuyente de gases de efecto invernadero; con la excepción de las bolsas de PP, donde cerca del 50 % de la contaminación es realizada por el transporte que, como ya fue mencionado, está asociada a una mayor cantidad de peso trasladado, siendo los viajes transoceánicos en barco uno de los mayores contribuyentes de emisiones de CO2 a nivel mundial. Es importante añadir, que por primera vez la etapa de desechos posee una gran contribución en un indicador de impacto; como se visualiza en la figura 4.14 para el caso de las bolsas compostables. Esto se debe a que los biopolímeros cuando son degradados de forma aeróbica en condiciones óptimas producen CO2 y agua, sin embargo, en los vertederos no consiguen el oxígeno suficiente por lo que este proceso se realiza de forma anaeróbica y genera metano que contribuye en el aumento de este índice.

4.2. Análisis de sensibilidad

En esta sección, se muestran los resultados obtenidos por el análisis de sensibilidad en el EICV para 3 casos distintos:

- Utilizar una extrusora doble tornillo en la producción de las bolsas.
- Fabricar las bolsas con PEAD 100 % reciclado.
- Reutilizar las bolsas de PEBD y PP.

Aquí se muestran los resultados generales y por etapa para cada caso, además de realizar cálculos comparativos con la sección 4.1.

4.2.1. Caso 1: Extrusora doble tornillo

4.2.1.1. Resultados generales

En la tabla 4.5 se indican los valores generales obtenidos para este análisis. Dado que la producción de bolsas de PP no considera extrusora doble tornillo, los índices corresponden a los mostrados en el caso base y quedan excluidos de este caso.

Tabla 4.5: Resultados del EICV para el caso de extrusora doble tornillo.

Tipo de bolsa	Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DBeq]	Agotamiento de recursos fósiles [MJ]	Cambio climático GWP100 [kg CO2eq]
COMPOST	3.107,560	27,532	2,626
PEAD	1.445,720	16,385	1,116
PEAD OXO	1.482,750	17,140	1,152
PEBD	5.542,170	65,642	4,413

Adicionalmente, se realiza un cálculo comparativo para ver cuál es el porcentaje de aumento para este análisis. La tabla 4.6 muestra cómo varía la Ecotoxicidad marina para este caso y se observa un gran aumento de este índice: se eleva alrededor de un 25 % en las bolsas compostables, de PEAD y PEAD con aditivos. En el caso de las bolsas de PEBD este aumento es aún mayor (34,43 %) debido a que el peso de estas bolsas es mayor y por tanto utiliza una cantidad de energía más alta en su producción.

Tabla 4.6: Comparación de la Ecotoxicidad marina obtenida al usar extrusora monotornillo y doble tornillo.

Tipo de bolsa	Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DBeq]		
	Monotornillo	Dobletornillo	Variación
COMPOST	2.499,130	3.107,560	24 %
PEAD	1.149,830	1.445,720	26 %
PEAD OXO	1.178,680	1.482,750	26 %
PEBD	4.122,690	5.542,170	34 %

Asímismo, la figura 4.19 grafica la Ecotoxicidad marina obtenida para ambos casos. Cabe destacar que utilizando extrusora doble tornillo la bolsa de PEBD se convierte en la bolsa que más ecotoxicidad marina produce, desplazando a la bolsa de PP. En este caso, la bolsa de PEBD emite 1.300 kg de 1,4-DBeq por kilogramo de bolsa de fabricada, mientras que las compostables generan cerca de 1.400 kg de este componente, por lo que, ambas nuevamente son las más contaminantes para los ecosistemas marinos.

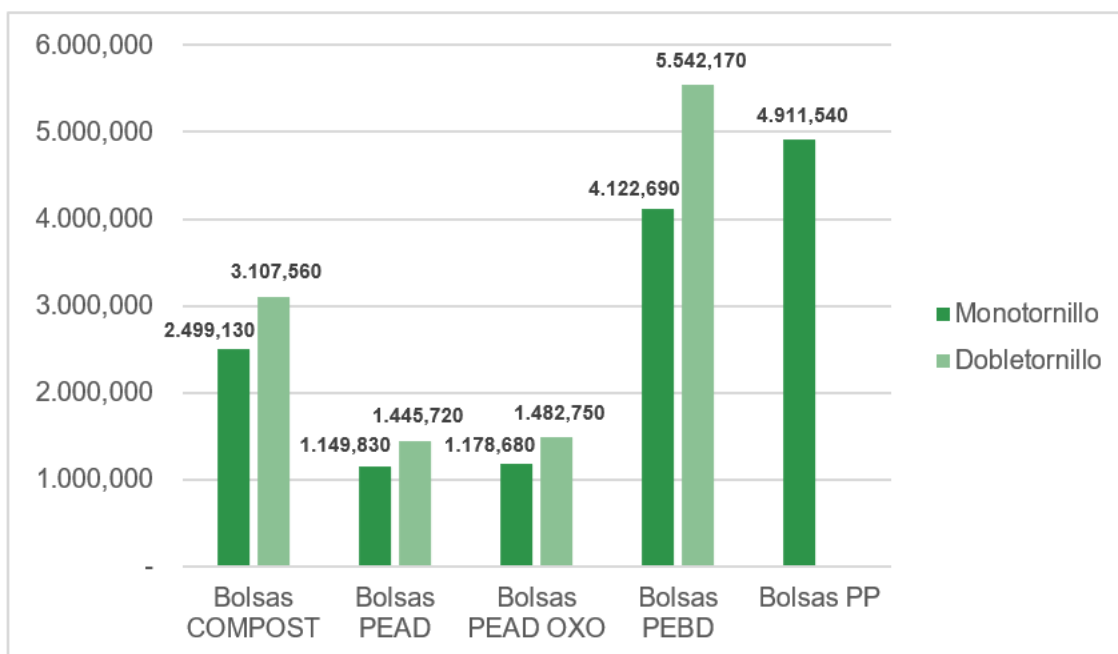


Figura 4.19: Ecotoxicidad marina obtenida utilizando extrusora doble tornillo en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente.

Luego, la tabla 4.7 indica la variación en el Agotamiento de recursos fósiles para ambos casos. A diferencia de la Ecotoxicidad marina, las bolsas de PEAD y PEAD oxodegradable son las que menos experimentan un cambio en cuanto al consumo de recursos fósiles, mientras que las bolsas compostables experimentan un aumento mayor. Esto se debe a que éstas últimas utilizan 2 MJ más en la producción de bolsas, que en el caso monotornillo; mientras que las bolsas de PEAD y PEAD oxodegradables solo requieren de 1 MJ más al utilizar la extrusora doble tornillo. En el caso de las bolsas de PEBD, éstas utilizan 4 MJ más que en el caso base, por lo que es esperable que sufriera el mayor aumento.

Tabla 4.7: Comparación del Agotamiento de recursos fósiles obtenido al usar extrusora monotornillo y doble tornillo.

Tipo de bolsa	Agotamiento de recursos fósiles [MJ]		
	Monotornillo	Doble tornillo	Variación
COMPOST	23,384	27,532	18 %
PEAD	14,368	16,385	14 %
PEAD OXO	15,067	17,140	14 %
PEBD	54,571	65,642	20 %

La figura 4.20 muestra éste índice para ambos casos de forma comparativa, donde se puede observar que las bolsas de PP continúan siendo las que más recursos consumen.

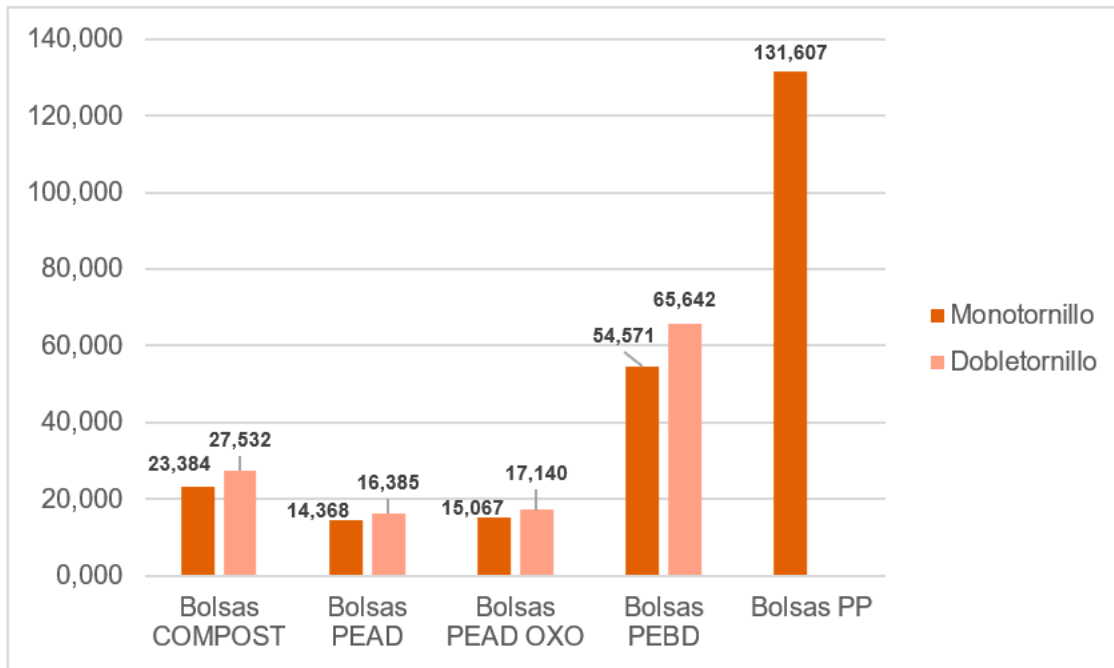


Figura 4.20: Agotamiento de recursos fósiles obtenido utilizando extrusora doble tornillo en MJ.

Por último, la tabla 4.8 indica cómo varía el Índice de cambio climático GWP100 para el caso de extrusora monotornillo y doble tornillo.

Tabla 4.8: Comparación del Índice de cambio climático GWP100 al usar extrusora monotornillo y doble tornillo.

Tipo de bolsa	Índice de cambio climático GWP100 [kg CO ₂ eq]		
	Monotornillo	Doble tornillo	Variación
COMPOST	2,28	2,626	15 %
PEAD	0,95	1,116	18 %
PEAD AD	0,98	1,152	18 %
PEBD	3,55	4,413	25 %

Mientras que la figura 4.21 grafica la comparación del índice entre ambos casos.

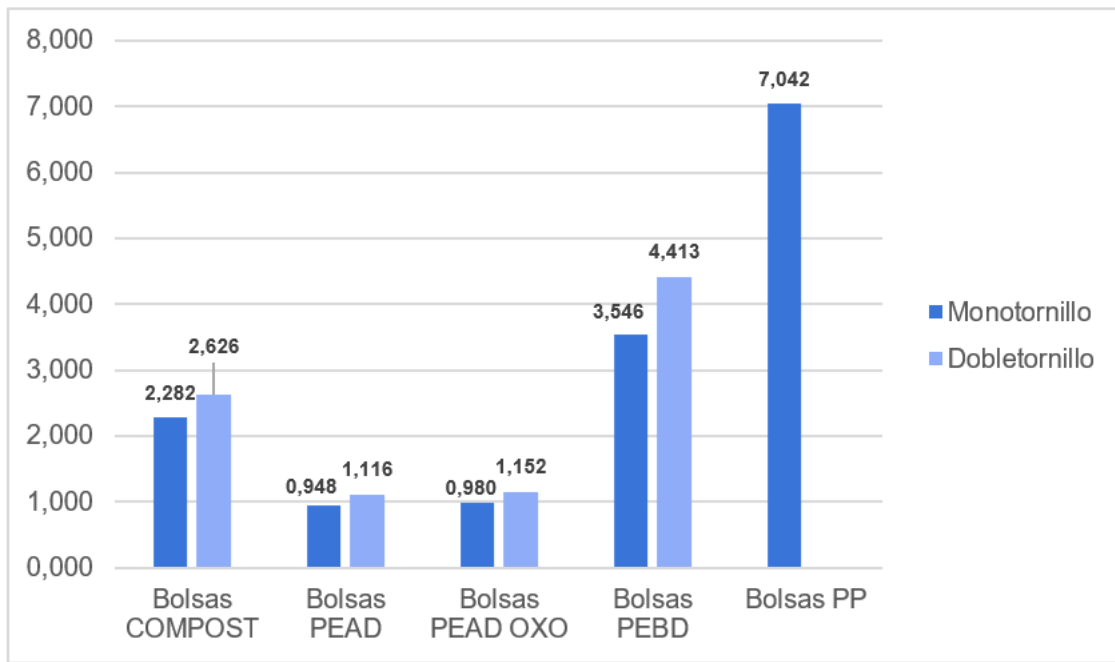


Figura 4.21: Índice de cambio climático obtenido utilizando extrusora doble tornillo en kg de CO2 equivalente.

4.2.1.2. Resultados por etapa

De acuerdo a lo observado en la sección 3.2.2. se consume más energía con una extrusora doble tornillo, por lo que, el cambio en el EICV solamente se produce en la etapa de producción de las bolsas y se considera lineal. Esto implica que el aumento porcentual indicado en los resultados generales esta directamente asociado a la producción de las bolsas, mientras que el resto de las etapas mantienen sus números.

En las tablas 4.9, 4.10 y 4.11, se exhiben los valores por etapa obtenidos al utilizar una extrusora doble tornillo.

Tabla 4.9: Ecotoxicidad marina para el caso con extrusora doble tornillo en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente

	Produccion Pellet	Transporte Pellet	Produccion Bolsas	Desecho Bolsas	Total
Bolsas COMPOST	261,645	170,448	2.564,695	111,0	3.107,788
Bolsas PEAD	39,327	105,929	1.299,107	1,361	1.445,725
Bolsas PEAD OXO	35,269	109,287	1.336,787	1,400	1.482,743
Bolsas PEBD	154,596	430,698	4.951,357	5,510	5.542,161
Bolsas PP	220,645	1.495,883	2.947,688	247,0	4.911,216

Tabla 4.10: Agotamiento de recursos fósiles para el caso con extrusora doble tornillo contri- buidos por cada etapa en MJ.

	Produccion Pellet	Transporte Pellet	Produccion Bolsas	Desecho Bolsas	TOTAL
Bolsas COMPOST	3,576	5,342	17,486	1,130	27,533
Bolsas PEAD	4,092	3,298	8,857	0,138	16,385
Bolsas PEAD OXO	4,482	3,402	9,114	0,142	17,140
Bolsas PEBD	17,917	13,409	33,757	0,559	65,642
Bolsas PP	62,187	46,570	20,097	2,750	131,604

Tabla 4.11: Índice de cambio climático GWP100 para el caso con extrusora doble tornillo en kg de CO2

	Produccion Pellet	Transporte Pellet	Produccion Bolsas	Desecho Bolsas	TOTAL
Bolsas COMPOST	0,015	0,387	1,452	0,773	2,627
Bolsas PEAD	0,137	0,239	0,735	0,004	1,116
Bolsas PEAD OXO	0,144	0,247	0,757	0,004	1,152
Bolsas PEBD	0,621	0,972	2,803	0,017	4,413
Bolsas PP	1,885	3,376	1,669	0,112	7,042

4.2.2. Caso 2: Pellet de PEAD 100 % reciclado

4.2.2.1. Resultados generales

En este caso, solo varían los indicadores de las bolsas de fabricadas con PEAD, por lo que, solo se muestran los resultados obtenidos para las bolsas de PEAD y PEAD con aditivos oxodegradantes, mientras el resto de las bolsas mantiene sus índices.

En primer lugar, la tabla 4.12 indica la variación porcentual para la Ecotoxicidad marina al usar PEAD virgen y PEAD 100 % reciclado. El aumento de un 18 % se debe a los procesos extras necesarios para el reciclado del polietileno, lo que añade compuestos tóxicos al sistema.

Tabla 4.12: Comparación de la Ecotoxicidad Marina al usar PEAD virgen y 100 % reciclado.

Tipo de bolsa	Ecotoxicidad marina [kg 1,4-Dbeq]		
	PEAD virgen	PEAD reciclado	Variación
PEAD	1.149,830	1.355,010	18 %
PEAD OXO	1.178,680	1.396,040	18 %

La figura 4.22 grafica la comparación entre ambos casos para este índice.



Figura 4.22: Ecotoxicidad marina obtenida al utilizar PEAD 100 % reciclado en kg de 1,4-Diclorobenceno equivalente.

Luego, en la tabla 4.13 se indica la disminución porcentual del Agotamiento de recursos fósiles para el caso base y al utilizar PEAD 100 % reciclado. La disminución de un 21 % puede deberse a que no se extrae petróleo para la fabricación de polietileno.

Tabla 4.13: Comparación del Agotamiento de recursos fósiles al usar PEAD virgen y 100 % reciclado.

Tipo de bolsa	Agotamiento de recursos fósiles [MJ]		
	PEAD virgen	PEAD reciclado	Variación
PEAD	14,368	11,400	-21 %
PEAD OXO	15,067	11,925	-21 %

En la figura 4.23 se puede observar cómo varía el Agotamiento de recursos fósiles al utilizar PEAD 100 % reciclado en relación al caso base.

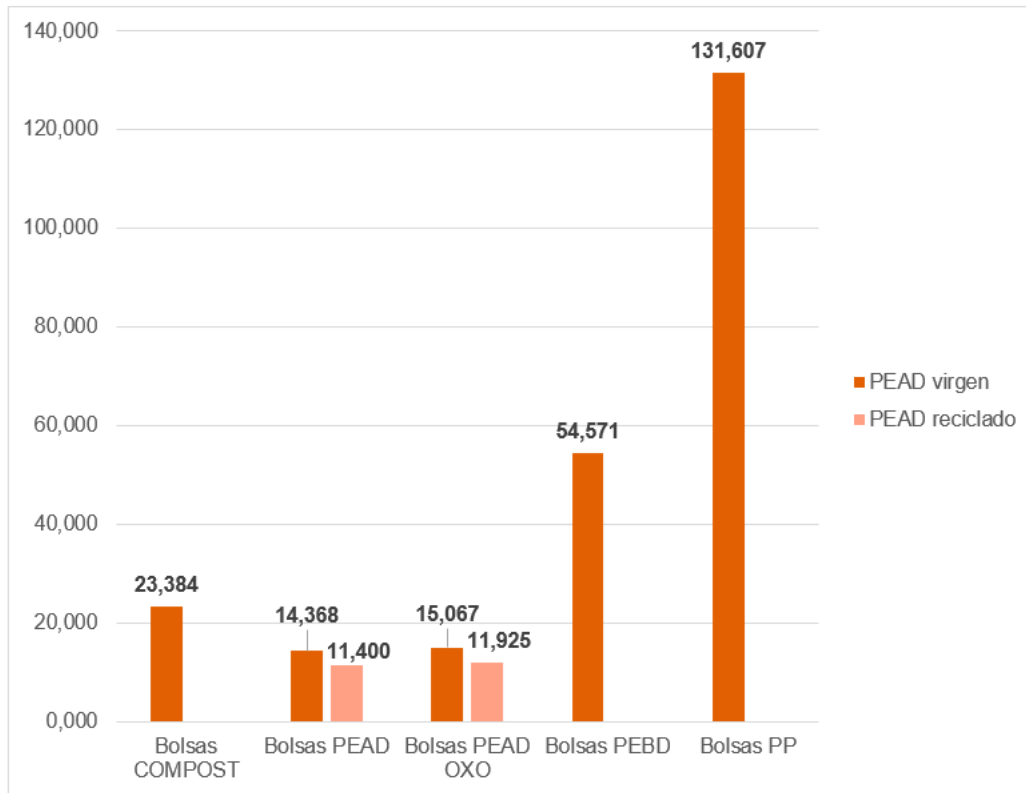


Figura 4.23: Agotamiento de recursos fósiles obtenido al utilizar PEAD 100 % reciclado en MJ.

Por último, la tabla 4.14 muestra la comparación entre el Índice de cambio climático GWP100 obtenido por el caso base y con PEAD 100 % reciclado. La disminución de un 6 % de este índice se debe a que hay menos producción de pellet virgen y, por ende, hay menos emisiones de GEI asociados a la extracción de petróleo. A la vez se tiene que considerar que el reciclado de PEAD también genera kg de CO₂eq, por lo que la variación es menor en comparación los otros índices.

Tabla 4.14: Comparación del Índice de cambio climático GWP100 al usar PEAD virgen y 100 % reciclado.

Tipo de bolsa	Índice de cambio climático GWP100 [kg CO ₂ eq]		
	PEAD virgen	PEAD reciclado	Variación
PEAD	0,948	0,888	-6 %
PEAD OXO	0,888	0,916	-6 %

En tanto, la figura 4.24 grafica la disminución de este índice para el caso base y al utilizar PEAD 100 % reciclado.

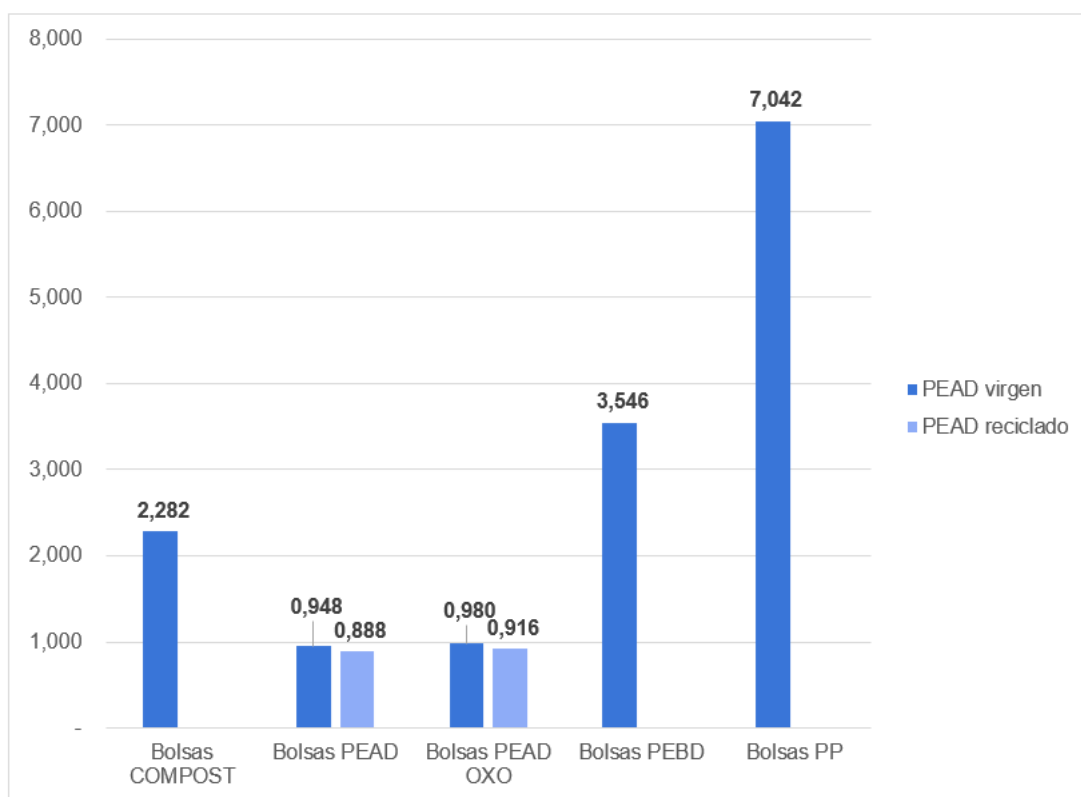


Figura 4.24: Índice de cambio climático obtenido al utilizar PEAD 100 % reciclado en kg de CO2 equivalente. .

4.2.2.2. Resultados por etapa

La tabla 4.15 muestra los resultados por etapa de la Ecotoxicidad marina obtenida al utilizar PEAD 100 % reciclado.

Tabla 4.15: Ecotoxicidad marina para el caso con PEAD 100 % reciclado en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente

	Produccion Pellet	Transporte Pellet	Produccion Bolsas	Desecho Bolsas	Total
Bolsas PEAD	244,495	105,929	1.003,217	1,361	1.355,002
Bolsas PEAD OXO	252,626	109,287	1.032,723	1,4	1.396,036

La figura 4.25 muestra una comparación por etapa de la Ecotoxicidad marina obtenida para las bolsas de PEAD en este caso. En la gráfica se aprecia que al utilizar PEAD 100 % reciclado aumenta en un 521 % este índice en la producción del pellet, mientras que en el desecho de bolsas solo aumenta un 0,36 %. Tanto la etapa de transporte de pellet como la de producción de las bolsas mantienen sus índices.

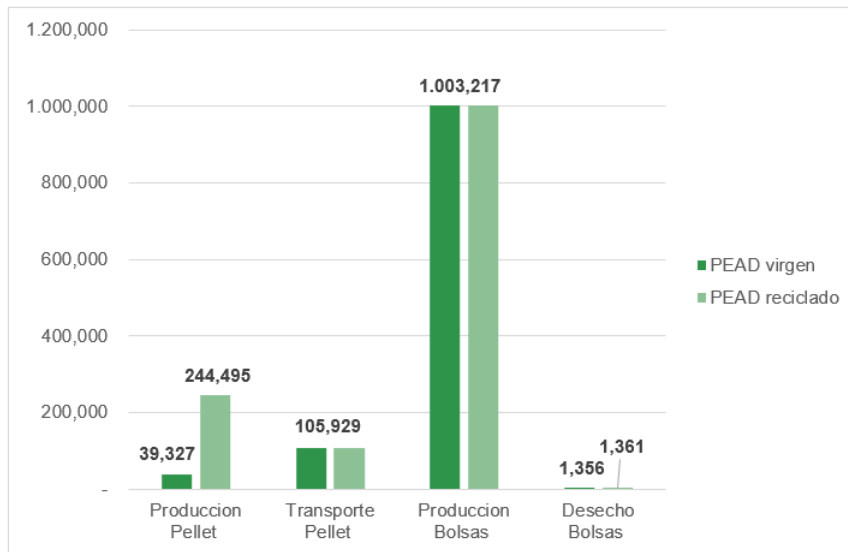


Figura 4.25: Ecotoxicidad marina por etapa para bolsas de PEAD 100 % reciclado en kg de 1,4-Diclorobenceno equivalente.

En la figura 4.26 se exhibe la comparación por etapas de la Ecotoxicidad marina obtenida para las bolsas de PEAD con aditivos oxodegradantes. Al utilizar PEAD 100 % reciclado esta toxicidad aumenta en más de un 1.009 % durante la producción de pellet, mientras que en el desecho de estas bolsas disminuye en un 0,28 %.

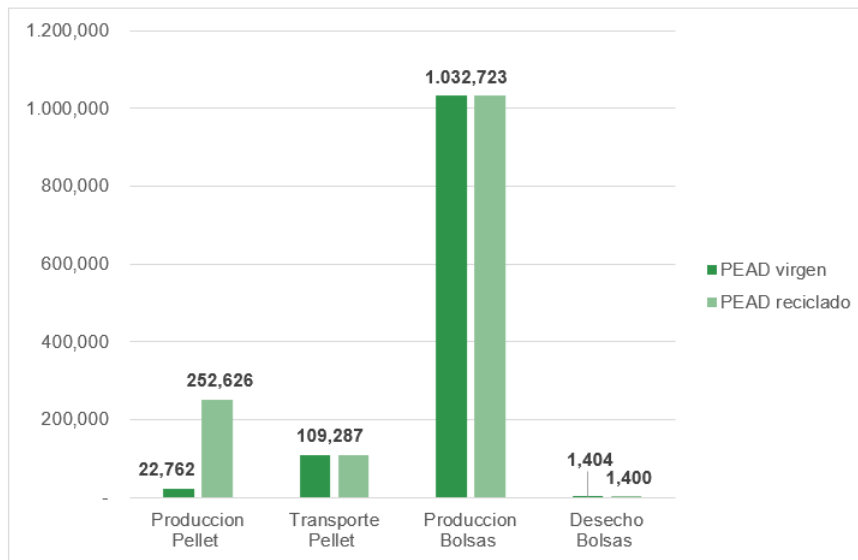


Figura 4.26: Ecotoxicidad marina por etapa para bolsas de PEAD 100 % reciclado con aditivos oxodegradables en kg de 1,4-Diclorobenceno equivalente.

Luego, la tabla 4.16 muestra el Agotamiento de recursos fósiles por etapa para este caso.

Tabla 4.16: Agotamiento de recursos fósiles para el caso con PEAD 100 % reciclado contri-
buidos por cada etapa en MJ.

	Produccion Pellet	Transporte Pellet	Produccion Bolsas	Desecho Bolsas	TOTAL
Bolsas PEAD	1,125	3,298	6,840	0,138	11,4
Bolsas PEAD OXO	1,339	3,402	7,041	0,142	11,924

La figura 4.27 muestra los resultados por etapa del Agotamiento de recursos fósiles para bolsas de PEAD virgen comparado con bolsas de PEAD 100 % reciclado. Se observa que este índice disminuye un 72 % en la producción de pellet, mientras que en el desecho de las bolsas disminuye en un 71 %.

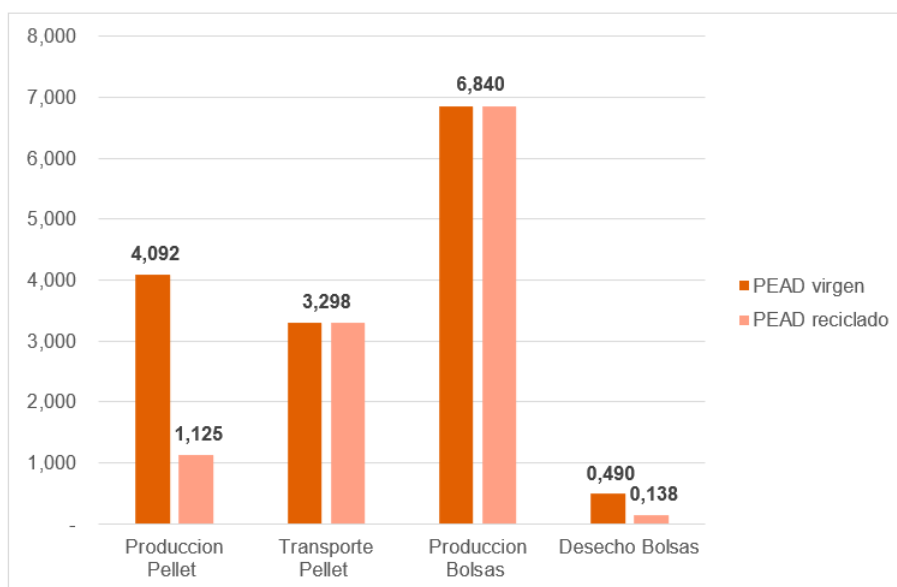


Figura 4.27: Agotamiento de recursos fósiles por etapa para bolsas de PEAD 100 % reciclado en MJ.

La figura 4.28 exhibe una comparación entre el Agotamiento de recursos fósiles obtenidos por etapa para las bolsas de PEAD con aditivos oxodegradables al utilizar PEAD virgen y 100 % reciclado. En este caso, la única etapa que presenta diferencias corresponde a la de producción de pellet, donde este agotamiento aumenta en un 55 %.

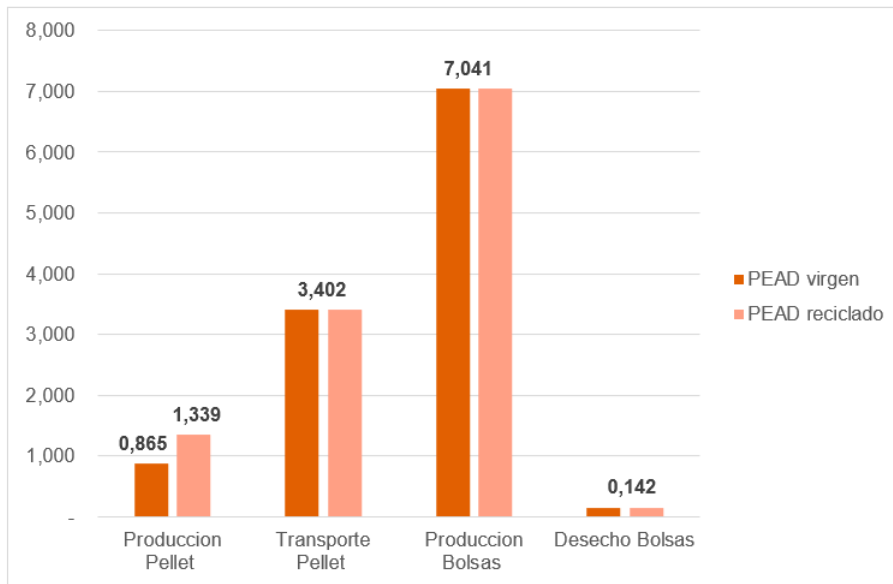


Figura 4.28: Agotamiento de recursos fósiles por etapa para bolsas de PEAD 100% reciclado con aditivos oxodegradables en MJ.

Finalmente, en la tabla 4.17 se muestran los resultados por etapa del Índice de cambio climático GWP100 para este caso.

Tabla 4.17: Índice de cambio climático GWP100 para el caso con pellet de PEAD 100% reciclado en kg de CO₂

	Produccion Pellet	Transporte Pellet	Produccion Bolsas	Desecho Bolsas	TOTAL
Bolsas PEAD	0,077	0,239	0,568	0,004	0,888
Bolsas PEAD OXO	0,081	0,247	0,585	0,004	0,916

En la figura 4.29 se exhibe la comparación por etapas de este índice para las bolsas de PEAD hechas con material virgen y con material 100% reciclado. En la producción de pellet los kg de CO₂ equivalente disminuyen en un 49%, mientras que en el desecho disminuye en un 71%; el resto de las etapas mantiene sus valores.

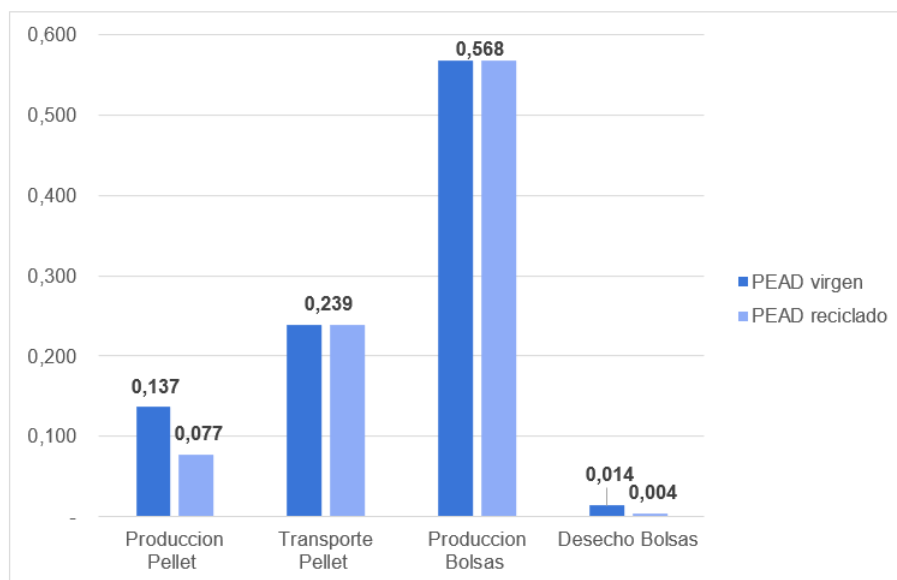


Figura 4.29: Índice de cambio climático GWP100 por etapa para bolsas de PEAD 100% reciclado en kg de CO2.

La figura 4.30 muestra la comparación por etapas del Índice de cambio climático GWP100 para las bolsas de PEAD con oxodegradantes para el caso base y al utilizar PEAD 100% reciclado. Se observa que la producción de pellet incurre en un aumento del 119% para este índice, mientras que el resto de las etapas mantiene sus valores.

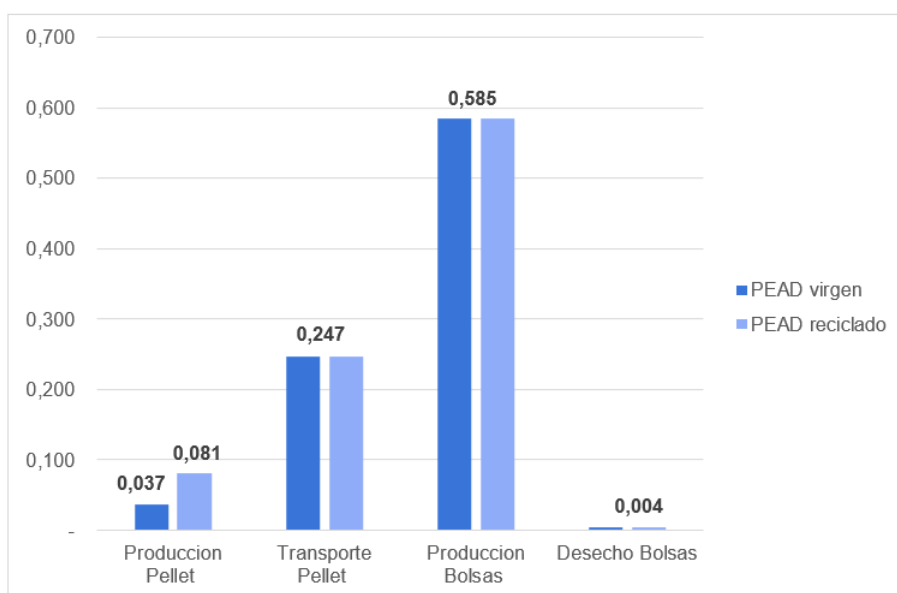


Figura 4.30: Índice de cambio climático por etapa para bolsas de PEAD 100% reciclado con aditivos oxodegradables en kg de CO2.

4.2.3. Caso 3: Bolsas reutilizables

Para este análisis se considera que las bolsas de PEBD se reutilizan 3 veces, mientras que las de PP lo hacen 10 veces. Esto implica que la nueva unidad funcional cambia y por ende, los datos de entrada en todas las etapas también lo hacen.

La nueva unidad funcional de las bolsas de PEBD corresponden a 39 bolsas, mientras que las de PP son 12. Los nuevos valores de entrada de cada etapa se especifican en el Anexo B.

4.2.3.1. Resultados generales

En primer lugar, la tabla 4.18 muestra los resultados de los 3 indicadores obtenidos a partir del EICV. Dado que este análisis solo concierne a las bolsas hechas de PEBD y PP, el resto de las bolsas quedan excluidas de este caso.

Tabla 4.18: Resultados del EICV para el caso de reutilizar las bolsas de PEBD y PP

Tipo de bolsa	Ecotoxicidad marina [kg 1,4-Dbeq]	Agotamiento de recursos fósiles [MJ]	Índice de cambio climático [kg CO ₂ eq]
PEBD	1.447,020	18,687	1,223
PP	798,622	14,038	0,825

Luego, la tabla 4.19 indica la variación porcentual para la Ecotoxicidad marina entre el caso base y el de reutilización de las bolsas.

Tabla 4.19: Comparación de la Ecotoxicidad marina obtenida entre el caso base y el de reutilización de las bolsas de PEBD y PP.

Tipo de bolsa	Ecotoxicidad marina [kg 1,4-Dbeq]		
	Sin reuso	Con reuso	Variación
PEBD	4.122,69	1.447,02	-65 %
PP	4.911,54	798,62	-84 %

Mientras tanto, la figura 4.31 muestra la comparación entre el caso base y el actual para este indicador.

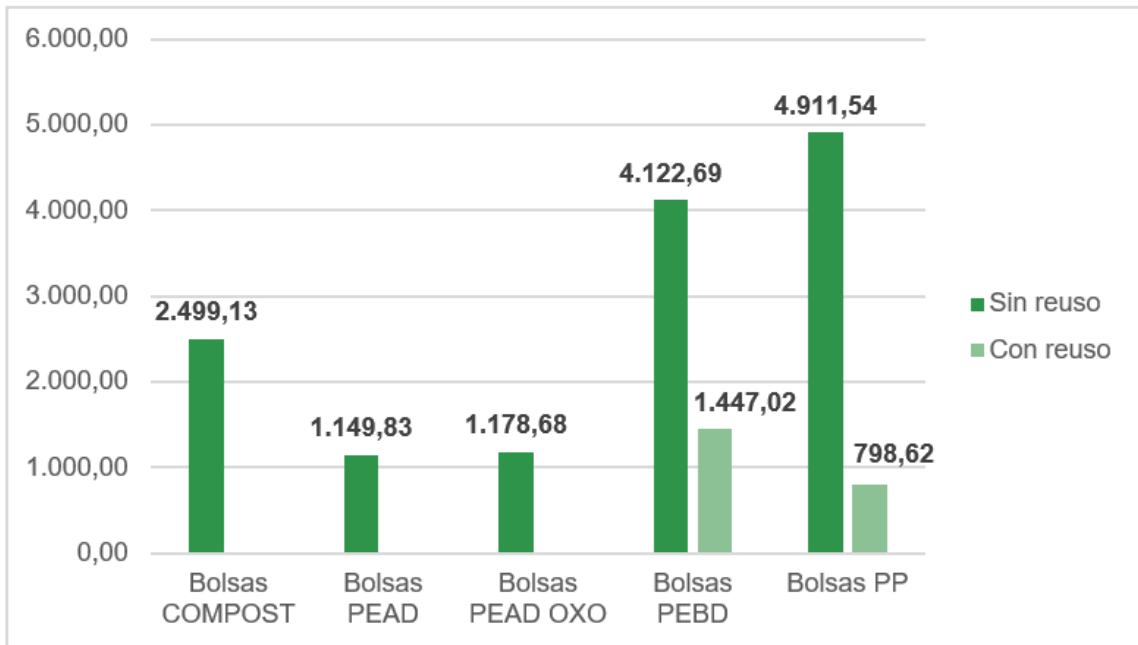


Figura 4.31: Ecotoxicidad marina obtenida al reutilizar las bolsas de PEBD y PP en kg de 1,4-Diclorobenceno equivalente.

Se observa que ahora las bolsas de PP son las que menos emisiones de 1,4-diclorobenceno equivalente generan, mientras que las bolsas de PEBD continúan siendo la segunda con más contaminación de este índice. Debido a que disminuye la unidad funcional de ambas bolsas, se reduce la cantidad de componentes necesarios para su fabricación y por ende, sus emisiones también lo hacen.

Luego, la tabla 4.20 muestra la disminución del Agotamiento de recursos fósiles al comparar el caso base con el de la reutilización de las bolsas.

Tabla 4.20: Comparación del Agotamiento de recursos fósiles obtenido entre el caso base y el de reutilización de las bolsas de PEBD y PP.

Tipo de bolsa	Agotamiento de recursos fósiles [MJ]		
	Sin reuso	Con reuso	Variación
PEBD	54,57	18,69	-66 %
PP	131,61	14,04	-89 %

En tanto, la figura 4.32 grafica la variación de este indicador entre el caso base y el de reutilización.

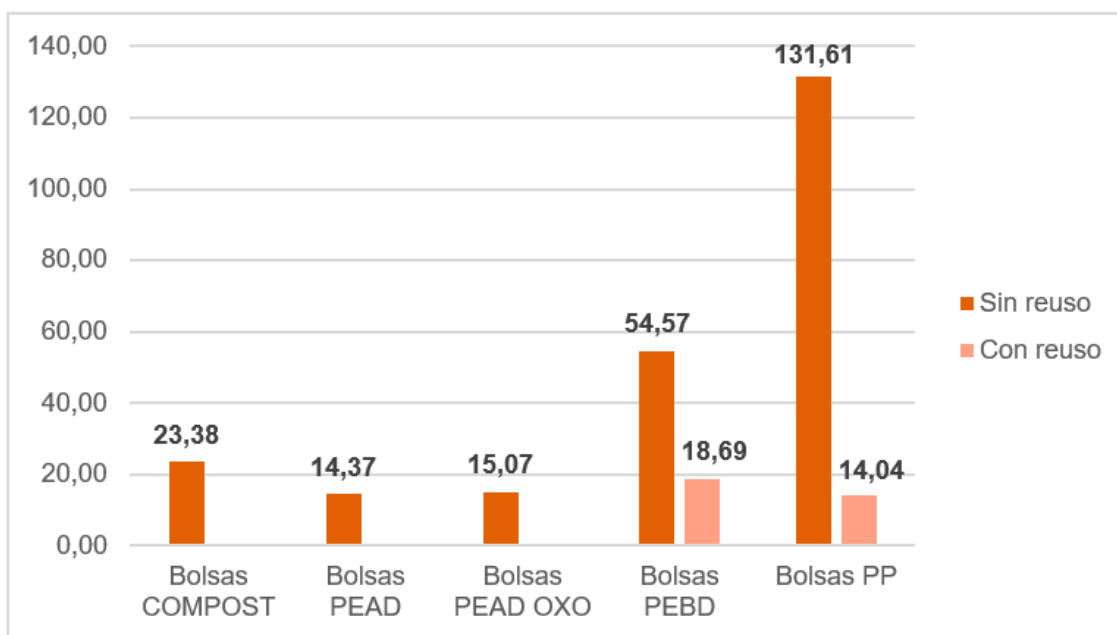


Figura 4.32: Agotamiento de recursos fósiles obtenida al reutilizar las bolsas de PEBD y PP en MJ.

A diferencia de la Ecotoxicidad marina, las bolsas de PP no corresponden a las bolsas que consumen menos combustibles fósiles. Las bolsas de PEAD continúan siendo las que poseen menor cantidad de este índice, aunque poseen una diferencia casi imperceptible. Por otro lado, las bolsas compostables se convierten en las que más combustibles fósiles consumen, mientras las bolsas de PEBD continúan siendo las segundas en este indicador.

Finalmente, la tabla 4.21 muestra la variación porcentual del Índice de cambio climático GWP100 entre el caso base y el de reutilización de las bolsas de PEBD y PP.

Tabla 4.21: Comparación del Índice de cambio climático GWP100 obtenido entre el caso base y el de reutilización de las bolsas de PEBD y PP.

Tipo de bolsa	Índice de cambio climático [kg CO ₂]		
	Sin reuso	Con reuso	Variación
PEBD	3,55	1,223	-66 %
PP	7,04	0,825	-88 %

La figura 4.33 grafica la comparación del índice entre ambos casos.

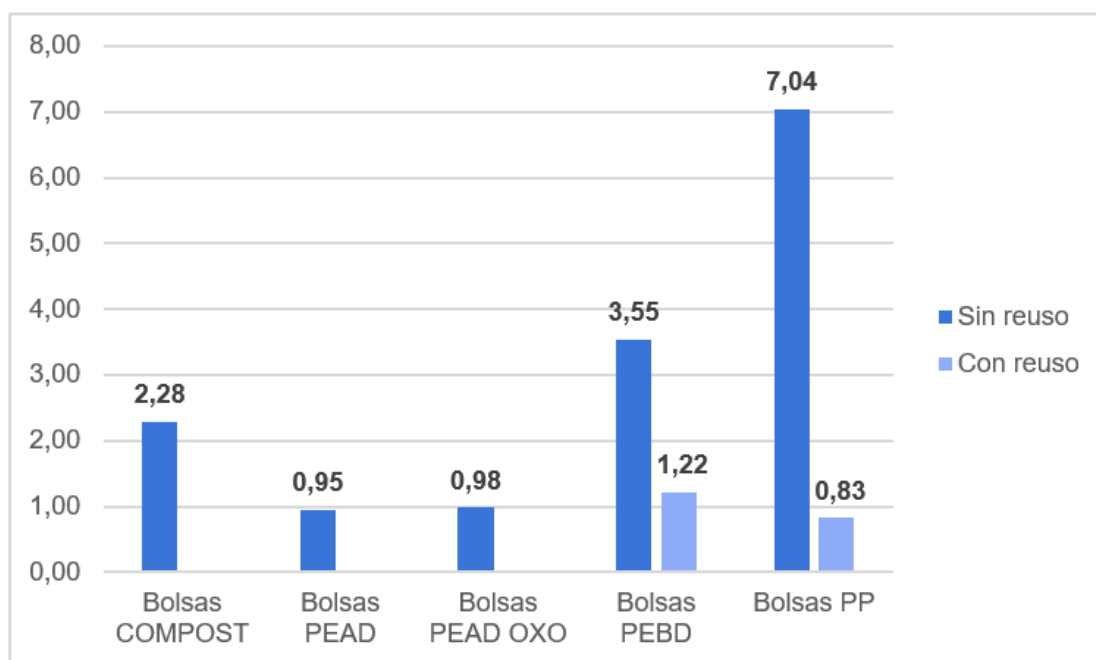


Figura 4.33: Índice de cambio climático GWP100 obtenida al reutilizar las bolsas de PEBD y PP en kg de CO2 equivalente.

En el caso del ICC, las bolsas de PP se convierten en las que generan menos kilogramos de CO2 equivalente, mientras las de PEBD siguen siendo las segundas en este indicador.

Realizando un análisis general, es posible indicar que al reutilizar 3 veces las bolsas de PEBD se logran disminuir alrededor de un 66 % todos los impactos en comparación al caso base, debido a que se está utilizando un tercio de los recursos en todas sus etapas. Considerando esto en un escenario ideal, donde la disminución de materia prima y energía requerida se comportan de forma proporcional, nos daría una fórmula de disminución de $(n - 1)/n$; esto indica que si se utilizan las bolsas 4 veces se llegue a una disminución del 75 % y 5 veces generaría una disminución del 80 %. Esto lograría que este tipo de bolsa obtenga menores impactos que las bolsas de PEAD, pero se tendría que estudiar la factibilidad de este número de reutilizaciones; las bolsas de PEBD no son conocidas como bolsas reutilizables, por lo que el público tiende a desecharlas después de un uso.

Por otro lado, si se reutilizan 10 veces las bolsas de PP se convierte en la bolsa con menos impactos, donde todas las categorías disminuyen en promedio un 87 %, que también coincide con una disminución de un 89 % en la utilización de recursos.

4.2.3.2. Resultados por etapa

A continuación, se muestra el detalle por etapa de la Ecotoxicidad marina para el caso de reutilización de las bolsas de PEBD y PP.

Tabla 4.22: Ecotoxicidad marina para el caso con la reutilización de bolsas de PEBD y PP en kg de 1,4-diclorobenceno equivalente.

	Produccion Pellet	Transporte Pellet	Produccion Bolsas	Desecho Bolsas	TOTAL
Bolsas PEBD	48,953	136,391	1.259,922	1,750	1.447,016
Bolsas PP	19,324	131,010	626,627	21,7	798,661

Mientras la figura 4.38 grafica los resultados obtenidos por etapa de este indicador en comparación al caso base de las bolsas de PEBD. Se observa que las etapas de producción de pellet, transporte y desecho de las bolsas disminuyen este indicador en un 67 %, mientras que la de producción de las bolsas lo hace en un 65 %.

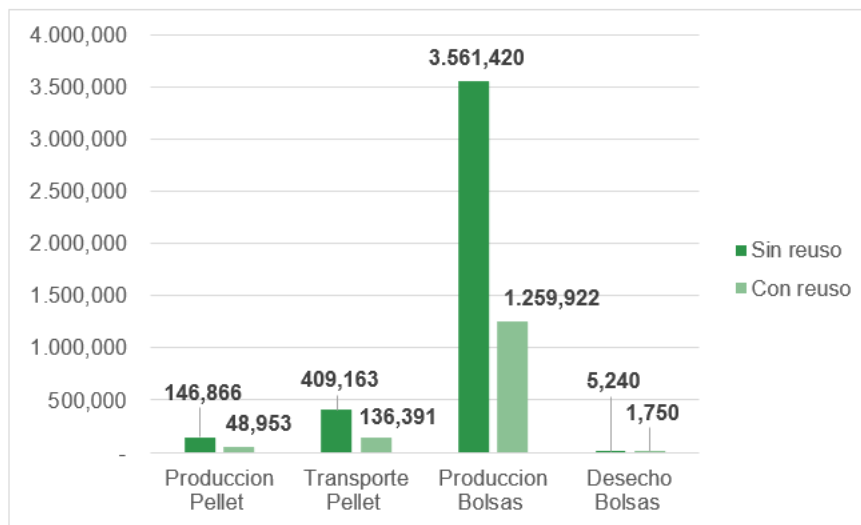


Figura 4.34: Ecotoxicidad marina obtenida por etapas al reutilizar las bolsas de PEBD en kg de 1,4-Diclorobenceno equivalente.

En tanto, la figura 4.35 muestra un gráfico comparativo para este indicador de las bolsas de PP. Las etapas de producción de pellet, transporte y desecho de las bolsas disminuyen este indicador en un 91 %, mientras que la de producción de las bolsas lo hace en un 79 %.

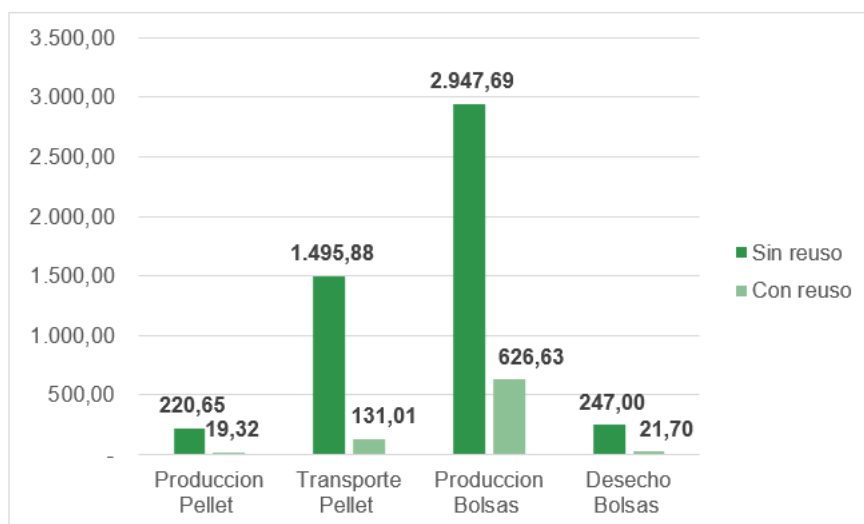


Figura 4.35: Ecotoxicidad marina obtenida por etapas al reutilizar las bolsas de PP en kg de 1,4-Diclorobenceno equivalente.

Luego, la tabla 4.23 indica el Agotamiento de recursos fósiles obtenido por etapas para ambas bolsas plásticas.

Tabla 4.23: Agotamiento de recursos fósiles para el caso de reutilizar las bolsas de PEBD y PP contribuidos por cada etapa en MJ

	Produccion Pellet	Transporte Pellet	Produccion Bolsas	Desecho Bolsas	TOTAL
Bolsas PEBD	5,674	4,246	8,590	0,178	18,688
Bolsas PP	5,446	4,079	4,272	0,241	14,038

Posteriormente, en la figura 4.36 se exhibe una comparación de los resultados obtenidos para este indicador pertenecientes a las bolsas de PEBD en el caso base y de reutilización. Las etapas de producción de pellet, transporte y desecho de bolsas muestran una disminución de un 67% en este indicador, mientras que la etapa de producción de las bolsas lo hace en un 65%.

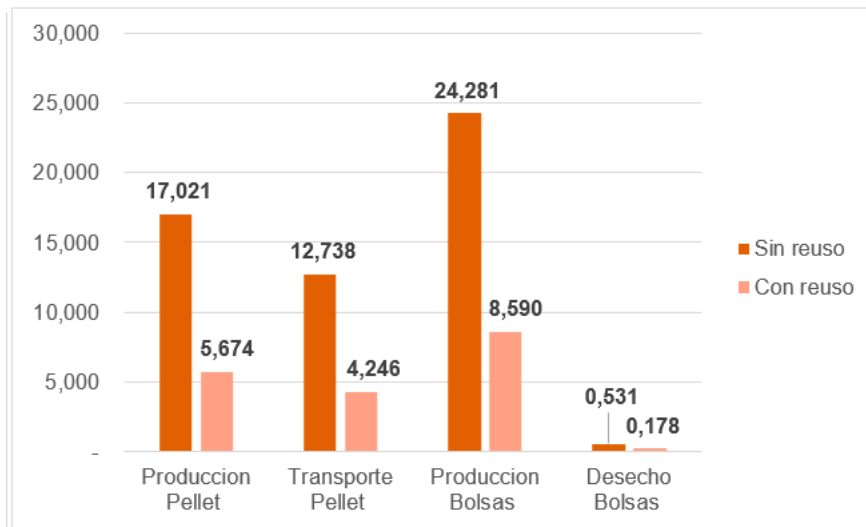


Figura 4.36: Agotamiento de recursos fósiles obtenido por etapas al reutilizar las bolsas de PEBD en MJ.

Mientras tanto, la figura 4.37 muestra dicha comparación para el caso de las bolsas de PP. Se observa que las etapas de producción de pellet, transporte y desecho de las bolsas reducen los valores de este indicador en un 91 %, en tanto la etapa de producción de las bolsas lo hace en un 79 %.

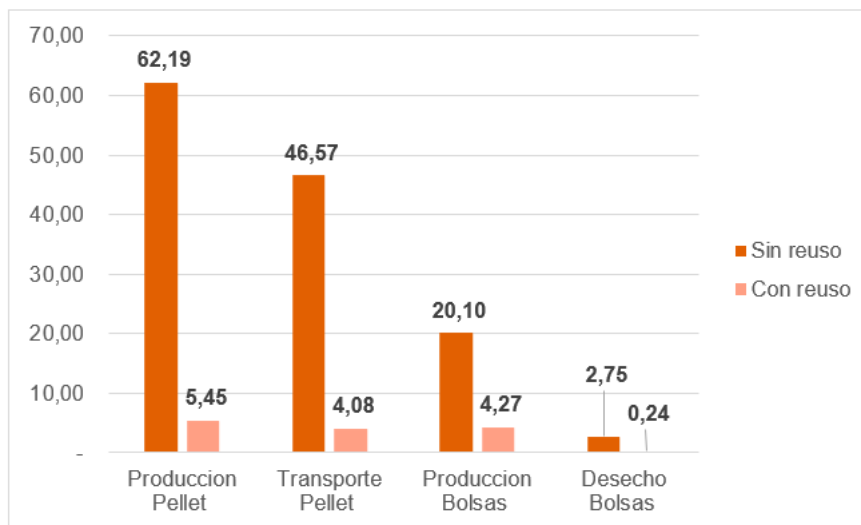


Figura 4.37: Agotamiento de recursos fósiles obtenido por etapas al reutilizar las bolsas de PP en MJ.

Finalmente, en la tabla 4.24 se muestran los valores del Índice de cambio climático GWP100 obtenidos por etapa para este caso.

Tabla 4.24: Índice de cambio climático GWP100 para el caso de reutilizar las bolsas de PEBD y PP en kg de CO2

	Produccion Pellet	Transporte Pellet	Produccion Bolsas	Desecho Bolsas	TOTAL
Bolsas COMPOST	0,015	0,387	1,107	0,773	2,282
Bolsas PEAD	0,137	0,239	0,568	0,014	0,958
Bolsas PEAD AD	0,037	0,247	0,585	0,004	0,873
Bolsas PEBD	0,197	0,308	0,713	0,005	1,223
Bolsas PP	0,165	0,296	0,355	0,010	0,825

Luego, se realiza una comparación para los valores obtenidos entre el caso base y el de reutilización pertenecientes a las bolsas de PEBD. La figura 4.38 muestra que las etapas de producción de pellet, transporte y desecho de las bolsas disminuyen en un 67 % éste índice, mientras que la de producción de las bolsas lo hace en un 65 %.

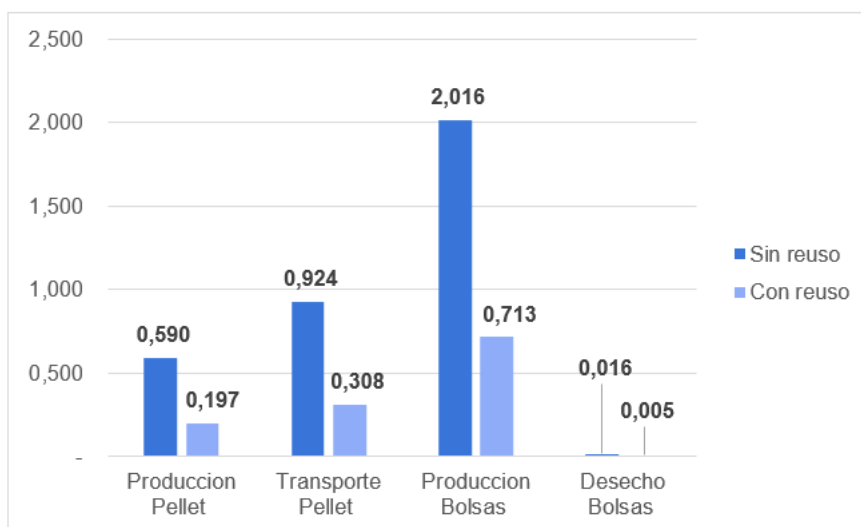


Figura 4.38: Índice de cambio climático GWP100 obtenido por etapas al reutilizar las bolsas de PEBD en kg de CO2 equivalente.

Por último, la figura 4.39 muestra esta comparación para el caso de las bolsas de PP. En ella se observa que la producción de pellet, el transporte y los desechos de las bolsas reducen este índice en un 91 %, en tanto la etapa de producción de las bolsas lo hace en un 79 %.

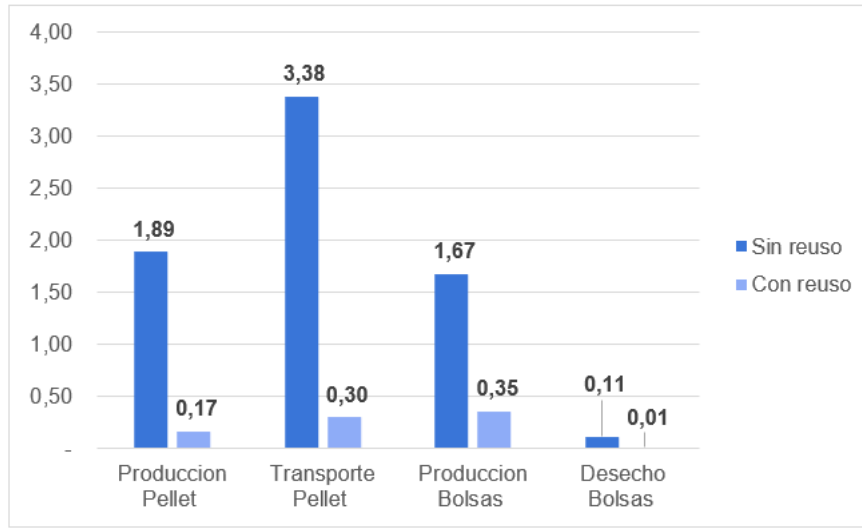


Figura 4.39: Índice de cambio climático GWP100 obtenido por etapas al reutilizar las bolsas de PP en kg de CO2 equivalente.

4.2.4. Potencial de desperdicios

A continuación, se muestran los resultados del cálculo de Potencial de Desperdicios para el caso base y para el caso de reutilización de las bolsas de PEBD y PP.

4.2.4.1. Caso Base

En la tabla 4.25 se muestran los valores a considerar para el cálculo de los potenciales de desperdicios en el caso base. La tasa de degradación fue obtenida a partir de un estudio realizado por la Universidad Estatal de California [33].

Tabla 4.25: Valores para el cálculo del índice de potencial de desperdicios en el caso base.

Tipo de bolsa	Cantidad (nxS)	Precio [\$CLP]	Peso [gr]	Degradación [1/día]
COMPOST	27,3	\$250	16,41	13,4
PEAD	26	\$50	7,95	0,1
PEAD OXO	26	\$50	8,20	0,1
PEBD	7,69	\$50	34,60	0,1
PP	1,90	\$100	115,83	0,1

Mientras que la tabla 4.26 indica los valores calculados para cada potencial a partir de los datos anteriores.

Tabla 4.26: Cálculo del potencial de desperdicios

Tipo de bolsa	P1	P2	P3	P4	LP
COMPOST	1	1	0,142	1	7
PEAD	0,952	0,2	0,069	0,0075	9.297
PEAD OXO	0,952	0,2	0,071	0,0075	9.011
PEBD	0,845	0,2	0,299	0,0075	1.896
PP	0,695	0,4	1	0,0075	233

El potencial de desperdicios no determina un impacto absoluto, si no que calcula un riesgo relativo entre las distintas bolsas y el valor obtenido se interpreta como la probabilidad en que cada bolsa pueda contribuir en el problema mundial de desechos. Para el caso de utilizar las bolsas una pura vez, la tabla 4.26 indica que se encontrarían 5 veces más bolsas de PEAD que de PEBD. Asimismo, los resultados indican que por cada 1000 bolsas de PEAD solo se encontrarán 25 bolsas de PP y que las bolsas compostables son aquellas que tienen un menor riesgo de contaminar el medio ambiente como desecho.

4.2.4.2. Caso 3: Reutilización de bolsas

De los 3 casos que se estudiaron en el análisis de sensibilidad, se tomará en cuenta el caso de la reutilización de las bolsas de PEBD y PP, debido a que es el único que logra cambios en los parámetros considerados en el cálculo.

La tabla 4.27 muestra los valores a considerar para el cálculo del potencial de desperdicios en este caso.

Tabla 4.27: Valores para el cálculo del índice de potencial de desperdicios en el caso 3.

Tipo de bolsa	Cantidad (nxS)	Precio [\$CLP]	Peso [gr]	Degradación [1/día]
COMPOST	27,3	\$250	16,41	13,4
PEAD	26	\$50	7,95	0,1
PEAD OXO	26	\$50	8,20	0,1
PEBD	7,69	\$50	34,60	0,1
PP	1,90	\$100	115,83	0,1

Finalmente, en la siguiente tabla se indican los valores calculados para cada potencial.

Tabla 4.28: Cálculo del potencial de desperdicios para el caso 3.

Tipo de bolsa	P1	P2	P3	P4	LP
COMPOST	1	1	0,142	1	7
PEAD	0,952	0,2	0,069	0,0075	9.297
PEAD OXO	0,952	0,2	0,071	0,0075	9.011
PEBD	0,282	0,2	0,299	0,0075	632
PP	0,070	0,4	1	0,0075	23

Para el caso de reutilizar las bolsas de PEBD y PP, se concluye que se encontrarían 15 veces más bolsas de PEAD que de PEBD como desechos, y menos de 3 bolsas de PP por cada 1000 de PEAD.

Si bien las bolsas de PP poseen un potencial de desperdicios bajo, socialmente son conocidas como *bolsas reutilizables* y solo son desechadas cuando se rompen, por lo que, es probable que su potencial sea aún menor. Paralelamente, las bolsas de PEBD poseen una mayor resistencia que las de PEAD, sin embargo, esta propiedad no es conocida y suele ser desechada luego de un uso. En este sentido, es recomendable realizar más estudios para determinar con certeza los factores de ponderación y obtener un potencial más acorde a la realidad.

4.3. Discusiones finales

Para finalizar se puede concluir que contrario a los valores de la tabla 4.1, las bolsas de PP son las menos contaminantes por kilogramo producido en todas los índices considerados. Lo que se ve reflejado en la reutilización de esta bolsa; si se reutiliza 10 veces, la cantidad de polímeros necesarios para fabricar esta bolsa disminuye en un 89 %, lo que a su vez disminuye en esta misma cifra porcentual todos los índices calculados.

En el caso de utilizar una extrusora doble tornillo se produce un aumento en la energía utilizada durante la producción de las bolsas, por lo que, los indicadores de impacto sufren aumentos en todas las bolsas. Si bien no se realizó un análisis de este tipo para bolsas de PP, dado los resultados obtenidos en las otras bolsas es esperable que los índices de impacto también aumenten si se utiliza una extrusora de doble tornillo en su producción.

Debido a que la base de datos utilizada no contaba con datos de polietileno de baja densidad reciclado, sería recomendable incluirlos en futuros análisis debido a que la cantidad de pellet de PEBD que se utiliza para fabricar una bolsa es mayor a la de PEAD y se podrían obtener resultados distintos a los encontrados en este estudio. Además, como se observa en la figura 4.37, la producción de pellet sigue siendo el mayor contribuyente en el agotamiento de recursos fósiles para el caso de las bolsas de PP, por lo que sería ideal contar con la base de datos para incluir un análisis de pellet de PP reciclado para determinar si es que se logra disminuir los impactos asociados a esta etapa.

Es importante notar que al reutilizar las bolsas de PEBD y PP, la bolsa compostable se convierte en aquella con mayor impacto. En todas las categorías el mayor contribuyente es la producción de las bolsas, sin embargo, en el caso del ICC los desechos aportan casi un 34% de este impacto, por lo que, el escenario ideal sería compostarlos en su totalidad de forma domiciliaria y eficiente. Dado que en las categorías de ecotoxicidad marina y agotamiento de recursos fósiles la producción de pellet poseen un impacto considerable, es recomendable que en futuras investigaciones se incluya el uso de otros biopolímeros con producción en Chile, para ver si este escenario produce mejoras en su ACV.

En cuanto a este estudio, habría sido recomendable realizarlo previo a la implementación de la ley para poder discutir la mejor forma de manejar los desechos marítimos que afectan a las costas de nuestro país y poder mitigar los efectos ambientales que el aumento en el consumo de otras bolsas produce. Si bien la entrega indiscriminada de bolsas en los supermercados estaba siendo insostenible en el corto plazo, en el largo plazo indicadores como el agotamiento de recursos fósiles o el ICC toman un gran peso frente al cambio climático, por lo que una mayor discusión con todos los actores involucrados en la ley habría sido esperable. Otro punto importante es la falta de estadísticas del comportamiento de las personas a un año de implementada la ley; para saber si la medida fue efectiva en cuanto a indicadores de impacto ambiental se necesita encuestar a la ciudadanía para saber cuántas veces ha tenido que comprar bolsas reutilizables, cuántas veces las ha reutilizado de forma efectiva y si ha utilizado bolsas compostables u otros sustitutos y comparar esos números con los expuestos en este estudio. Por ejemplo, si las personas han reutilizado las bolsas de PP menos de 10 veces durante un año, entonces el escenario es malo en comparación a utilizar bolsas desechables.

Basándose en la bibliografía estudiada para realizar este estudio, se indica que la eliminación de la bolsa plástica de un solo uso puede tener altos impactos ambientales debido a que son reemplazadas por bolsas de papel, cuya producción posee mayores valores de consumo energético y de agua, siendo así más contaminantes que aquellas provenientes de petróleo. Es por esto que para futuros trabajos se deben considerar las bolsas de papel – incluyendo su cantidad de usos y porcentaje de reciclado – y las de algodón – que suelen ser reutilizadas por un largo tiempo – para poder calcular si es que poseen o no un mayor impacto que las bolsas que fueron prohibidas por ley.

Capítulo 5

Conclusiones

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el ACV de las bolsas plásticas en Chile mediante el software OpenLCA, junto con un análisis de sensibilidad para determinar cómo influye la manufactura de éstas en los indicadores.

En primer lugar, se determinaron los impactos ambientales de cada bolsa en las categorías de: ecotoxicidad marina, agotamiento de recursos fósiles e índice de cambio climático para un solo uso. Los resultados mostrados en la tabla 5.1, determinaron que las bolsas de PP son las que más contaminan, seguidas de las bolsas de PEBD.

Tabla 5.1: Resultados del EICV para los 5 tipos de bolsas estudiadas.

Tipo de bolsa	Ecotoxicidad marina [kg 1,4-DBeq]	Agotamiento de recursos fósiles [MJ]	Cambio climático GWP100 [kg CO2eq]
COMPOST	2.499,13	23,38	2,28
PEAD	1.149,83	14,37	0,95
PEAD OXO	1.178,68	15,07	0,98
PEBD	4.122,69	54,57	3,55
PP	4.911,54	131,61	7,04

Los límites del sistema contemplan cuatro procesos en la fabricación de las bolsas: Producción del pellet, transporte del pellet, producción de las bolsas y desecho de éstas. El estudio concluye que la producción de bolsas es aquella que más contribuye a los impactos ambientales, en especial a la ecotoxicidad marina, donde es responsable de más del 80 % de las emisiones tóxicas para el caso de bolsas provenientes del polietileno, 78 % para las bolsas compostables y un 60 % para las de PP. En cuanto al agotamiento de recursos fósiles, la producción de pellet de PP constituye cerca de un 50 % de este indicador, mientras que para las hechas de polietileno este valor bordea el 30 % y para las compostables compone solamente un 15 %; la producción de pellet continúa siendo responsable de la mayor parte de este impacto para las bolsas de PEAD, PEAD con aditivos y compostables. En cuanto al ICC, el transporte de pellet corresponde a un 48 % de las emisiones de CO₂, mientras que en

las bolsas de polietileno este valor no supera el 30% y en las compostables solo constituye un 17%. Cabe destacar que en este indicador el desecho de bolsas compostable corresponde a un 34%, mientras que en el resto de las bolsas no supera el 2%.

Luego, se realizó un análisis de sensibilidad donde se estudiaron 3 escenarios distintos: utilización de una extrusora doble tornillo, reemplazo de pellet de PEAD virgen por uno 100% reciclado y reutilización de las bolsas de PEAD y PP, con 3 y 10 usos, respectivamente.

En el primer caso, al utilizar una extrusora doble tornillo se incurre en más gasto energético durante el proceso de fabricación de las bolsas. Específicamente, la ecotoxicidad marina aumentó en un 25% para las bolsas compostables, de PEAD y PEAD con aditivos, mientras que en las bolsas de PEBD subió 34%. El agotamiento de recursos fósiles aumentó en un 17% para las bolsas compostables, 14% para las de PEAD y PEAD con aditivos y 20% para las de PEBD. En tercer lugar, el ICC de las bolsas compostables aumentó un 15%, el de las bolsas de PEAD y PEAD con aditivos aumentaron casi 18% y un 24% para las de PEBD.

En el caso de utilizar pellet de PEAD 100% reciclado, se obtuvo un efecto negativo en la ecotoxicidad marina, donde aumenta en un 15%. Al contrario, el agotamiento de recursos fósiles se reduce en un 26% y el ICC en un 7%.

En el tercer caso, se determinó que reutilizar 10 veces las bolsas de PP logran que sea aquella con menor impacto en el ACV, logrando disminuir los indicadores en más de un 84%. Mientras que si se reutilizan 3 veces las bolsas de PEBD, sus impactos disminuyen en un 66%, no obstante continúa siendo la segunda bolsa con mayor impacto. Se espera que si se reutiliza la bolsa 4 veces, se convertirá en la segunda bolsa con menos impacto.

En cuanto a las bolsas compostables, se determinó que los desechos de estas contribuyen un gran porcentaje del ICC en su totalidad, por lo que, el escenario ideal sería compostarlas de forma domiciliaria.

En síntesis, el ACV indica que el mejor escenario para disminuir los impactos ambientales de las bolsas analizadas corresponde a fabricar bolsas con pellet de PEAD 100% reciclado, reutilizar las bolsas de PP 10 veces y las de PEBD 3 veces, además de evitar el desecho de las bolsas compostables en vertederos.

Además del ACV, se calculó un potencial de desperdicios que tomaba en cuenta la flotabilidad, precio, dimensiones y tasa de degradación de las bolsas. Como conclusión las bolsas PEAD obtuvieron un mayor riesgo, donde se establece que por cada 1000 bolsas de PEAD se encontrarán menos de 3 bolsas de PP en el mar, en el caso de reutilización, y 25 de PEBD.

Se deja para futuros análisis expandir la base de datos para incluir pellet de PP y PEBD reciclado, así como bolsas compostables hechas de otros biopolímeros. Además, se propone realizar este ACV incorporando bolsas de papel kraft y de algodón de modo de concluir si al reemplazar las bolsas plásticas por estas, se incurre en más o menos impactos ambientales. También se deben generar estadísticas del comportamiento de los clientes en cuanto a la reutilización de los sustitutos de las bolsas desechables para poder generar un juicio referente a la implementación de la ley en Chile.

Un desarrollo sostenible no sólo debe basarse en la preservación de vida marina y ecosistemas terrestres, si no también en la producción y consumo responsable por parte de las personas. Como un país cuya innovación y manufactura es limitada, se necesitan crear y modificar políticas que abarquen todas las aristas de la sustentabilidad de forma íntegra. No basta con que las industrias disminuyan sus producción, también debe existir una cooperación entre el gobierno, las empresas y las personas en pos de una economía circular, donde los productos sean reutilizados lo más posibles y no terminen su ciclo de vida en desechos, si no que se reciclen y transformen en otros productos. Con un cambio climático cada vez más presente es necesario que en Chile se creen políticas de producción sustentable, reciclaje a gran escala y promoción del reuso de productos para dar el ejemplo a futuras generaciones.

Nomenclatura

1,4-DBeq 1,4-Diclorobenceno equivalente

ACV Análisis de Ciclo de Vida

CaCO₃ Carbonato de calcio

CENEM Centro de Embases y Embalaje de Chile

cm² Centímetro cuadrados

CO₂ Dióxido de carbono

COMPOST Compostable

EICV Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida

ICC Índice de Cambio Climático

ICV Inventario del Ciclo de Vida

ISO Organización Internacional de Normalización

kg kilogramo

kWh Kilowatt hora

m³ Metros cúbicos

MJ Mega joule

mm Milímetro

PEAD Polietileno de alta densidad

PEAD AD Polietileno de alta densidad con aditivos

PEBD Polietileno de baja densidad

PEBDL Polietileno de baja densidad linear

PP Polipropileno

TiO₂ Oxido de titanio

TNT Tejido no tejido

°C grados Celsius

Bibliografía

- [1] L. Jacquemin, P.-Y. Pontalier, and C. Sablayrolles, “Life cycle assessment (lca) applied to the process industry: A review,” *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, 09 2012.
- [2] R. Miller, “Plastic Shopping Bags: An Analysis of Policy Instruments for Plastic Bag Reduction,” pp. 5–66, 2012.
- [3] U. Environment, “La historia de la bolsa de plástico, desde su nacimiento hasta su prohibición,” 2018.
- [4] J. R. Jambeck, Q. Ji, Y.-G. Zhang, D. Liu, D. M. Grossnickle, and Z.-X. Luo, “Plastic waste inputs from land into the ocean,” *Science*, vol. 347, no. 6223, pp. 764–768, 2015.
- [5] V. Hidalgo-Ruz, L. Gutow, R. C. Thompson, and M. Thiel, “Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification,” *Environmental Science and Technology*, vol. 46, no. 6, pp. 3060–3075, 2012.
- [6] J. A. Ivar Do Sul and M. F. Costa, “The present and future of microplastic pollution in the marine environment,” *Environmental Pollution*, vol. 185, pp. 352–364, 2014.
- [7] F. Hidalgo, “Chile consume más de 3.400 millones de bolsas al año y 51 comunas han regulado su uso,” *La Tercera*, 2017.
- [8] J. M. Ojeda G, “Miles de toneladas menos de plástico: Todos los efectos del primer año sin bolsas,” *La Tercera*, 2019.
- [9] E. Lara, “Coartaron nuestra libertad: Plásticos mendoza estudia demandar al estado tras fin de las bolsas,” *Radio Bío Bío*, 2019.
- [10] V. Bisinella, P. F. Albizzati, T. F. Astrup, and A. Damgaard, “Life Cycle Assessment of grocery carrier bags,” *Environ. Proj. no. 1985*, no. 1985, pp. 1–144, 2018.
- [11] R. M. Kimmel, K. D. Cooksey, A. Littman, S. Ally, and T. N. Lebanon, “Life Cycle Assessment of grocery bags in common use in the United States,” pp. 5–100, 2014.
- [12] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 5ta ed., 2008.

- [13] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 5ta ed., 2008.
- [14] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 5ta ed., 2008.
- [15] B. Posada Bustamante, “La degradación de los plásticos.pdf,”
- [16] PapelYa!, “Bolsas plásticas camiseta blanca. Recuperado de <http://www.papelya.com>,” 2020.
- [17] N. L. Thomas, J. Clarke, A. R. McLauchlin, and S. G. Patrick, “Oxo-degradable plastics: Degradation, environmental impact and recycling,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Waste Resour. Manag.*, vol. 165, no. 3, pp. 133–140, 2012.
- [18] Providercom, “Bolsas big bag. Recuperado de <http://www.providercom.com>,” 2020.
- [19] B. . Marketing, “Bolsas Publicitaria TNT Giant. Recuperado de <http://www.bym.cl>,” 2020.
- [20] D. Verma and E. Fortunati, *Biobased and biodegradable plastics*, vol. 4. 2019.
- [21] Compostera, “Bolsa de maíz. Recuperado de <http://www.compostera.cl>,” 2020.
- [22] S. Hartikainen, “Biodegradability of Nonwoven Fabrics,” no. June, 2015.
- [23] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*. tercera ed ed., 2007.
- [24] D. Gopalakrishnan, “Manufacturing of needle punched nonwoven,”
- [25] D. Gopalakrishnan, “Manufacturing of needle punched nonwoven,” p. 2.
- [26] A. P. Acero, C. Rodríguez, and A. Ciroth, “LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories,” *openLCA*, no. February, pp. 1–23, 2014.
- [27] D. Civancik-Uslu, R. Puig, M. Hauschild, and P. Fullana-i Palmer, “Life cycle assessment of carrier bags and development of a littering indicator,” *Sci. Total Environ.*, vol. 685, pp. 621–630, 2019.
- [28] *Life cycle assessment of supermarket carrier bags : a review of the bags available in 2006*. 2011.
- [29] C. Chaffee and B. R. Yaros, “Life Cycle Assessment for Three Types of Grocery Bags - Recyclable Plastic; Compostable, Biodegradable Plastic; and Recycled, Recyclable Paper,” 2007.
- [30] K. O’farrel, “LCA of shopping bag alternatives,” 2009.
- [31] Y. Machinery, “Film Blowing Machine. Recuperado de <http://www.yunfengmachine.com>,” 2019.

- [32] Z. Z. Machinery, “Non woven Bag Making Machine. Recuperado de <http://wzzxjx.com/>,” 2019.
- [33] L. S. Adams, G. Petersen, and M. Leary, “Evaluation of the Performance of Rigid Plastic Packaging Containers, Bags, and Food Service Packaging in Full-Scale Commercial Composting,” 2007.

Apéndice A

Energía consumida para fabricar las bolsas

Tabla A.1: Energía consumida para fabricar las bolsas de PEAD AD

Tipo de máquina	Horas de uso [hra]	Potencia usada [kWh]	Potencia Usada [MJ]
Extrusora monotornillo	0,0305	0,3351	1,2064
Extrusora doble tornillo	0,0178	0,6220	2,2391
Soplado	0,0355	0,5331	1,9193
Impresora	0,0135	0,0718	0,2584
Máquina sellado y corte	0,0090	0,0316	0,1137
TOTAL MONOTORNILLO			3,4978
TOTAL DOBLE TORNILLO			4,5305

Tabla A.2: Energía consumida pra fabricar las bolsas de PEBD

Tipo de máquina	Horas de uso [hra]	Potencia usada [kWh]	Potencia Usada [MJ]
Extrusora monotornillo	0,1141	1,2547	4,5169
Extrusora doble tornillo	0,0665	2,3288	8,3836
Soplado	0,1331	1,9961	7,1859
Impresora	0,0135	0,0718	0,2584
Máquina sellado y corte	0,0090	0,0316	0,1137
TOTAL MONOTORNILLO			12,0749
TOTAL DOBLE TORNILLO			15,9416

Tabla A.3: Energía consumida para fabricar las bolsas compostables

Tipo de máquina	Horas de uso [hra]	Potencia usada [kWh]	Potencia Usada [MJ]
Extrusora monotornillo	0,0610	0,6705	2,4137
Extrusora doble tornillo	0,0356	1,2444	4,4799
Soplado	0,0711	1,0667	3,8399
Impresora	0,0135	0,0718	0,2584
Máquina sellado y corte	0,0090	0,0316	0,1137
TOTAL MONOTORNILLO			6,6257
TOTAL DOBLE TORNILLO			8,6920

Tabla A.4: Energía consumida para fabricar las bolsas de PP.

Tipo de máquina	Horas de uso [hra]	Potencia usada [kWh]	Potencia Usada [MJ]
Extrusora monotornillo	0,0411	1,6444	5,9200
Máquina tejido	0,0181	0,3250	1,1700
Impresora	0,0264	0,3436	1,2369
Máquina sellado y corte	0,0925	0,4625	1,6650
TOTAL			9,9918

Apéndice B

Datos del ACV para el caso 3

Tabla B.1: Compuestos de las bolsas de PEBD cuando son reutilizadas 3 veces

COMPUESTOS	PEBD unitario	PEBD UF
PEBD	32,85	1.263,42
PEBDL	0,7	26,92
Óxido de Titanio	1,05	40,38
TOTAL [kg]	34,6	1,3307

Tabla B.2: Compuestos de las bolsas de PP cuando son reutilizadas 10 veces

COMPUESTOS	PP unitario	PP UF
PP	115,83	1278,20
TOTAL [kg]	115,83	1,28

Tabla B.3: Energía necesaria para fabricar las bolsas de PEBD reutilizadas 3 veces

Tipo de máquina	Horas de uso [hra]	Potencia usada [kWh]	Potencia Usada [MJ]
Extrusora monotornillo	0,0380	0,4182	1,5056
Soplado	0,0444	0,6654	2,3953
Impresora	0,0135	0,0718	0,2584
Máquina sellado y corte	0,009	0,0316	0,1137
		TOTAL	4,27

Tabla B.4: Energía necesaria para fabricar las bolsas de PP reutilizadas 10 veces

Tipo de máquina	Horas de uso [hra]	Potencia usada [kWh]	Potencia Usada [MJ]
Extrusora monotornillo	0,0044	0,1778	0,6400
Máquina tejido	0,0181	0,3250	1,1700
Impresora	0,0029	0,0371	0,1337
Máquina sellado y corte	0,01	0,05	0.18
		TOTAL	2,1237

Tabla B.5: Total de desechos en vertederos para las bolsas reutilizadas de PEBD y PP.

Tipo de bolsa	Bolsas totales [unidad]	Bolsas recicladas [unidad]	Peso en vertedero [kg]
PEBD	39	1	1,2961
PP	12	0	1,2782