

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Diseño e implementación de un sistema de gestión de plásticos reciclados en la  
producción de fundas de supermercado

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Dennise Alejandra Rosero Zapata

María Paz Calle Castro

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

## **Dedicatoria**

---

Dedico este trabajo a quienes me inspiraron, impulsaron y apoyaron a lo largo de este camino. Y a mis fieles amigos, Osito y Kay, que siempre me acompañaron en las noches de estudio sin dormir.

*Dennise Alejandra Rosero Zapata*

## Dedicatoria

---

A mi abuelo Jorge, que desde el cielo me acompaña y guía. Este logro también es suyo, porque siempre creyó en mí y deseó este momento tanto como yo. Su amor y enseñanzas permanecen en cada paso que doy.

A mi familia, mi mayor motivo y fortaleza, gracias por su apoyo incondicional y por ser mi inspiración para alcanzar esta meta. Todo lo que soy y lo que logro es por y para ustedes. Este triunfo es tan suyo como mío.

*María Paz Calle Castro*

## Agradecimiento

---

Agradezco en primer lugar a Dios, por darme la fortaleza y sabiduría necesarias para enfrentar cada desafío y alcanzar este logro en mi vida. A mis profesores que me guiaron con su conocimiento y dedicación a lo largo de mi carrera, en especial a nuestra tutora MSc. Jenny Venegas por su paciencia y compromiso en este proyecto.

A mi familia, por ser mi mayor soporte, por creer en mí y por brindarme su amor incondicional. A mis amigos, gracias por convertir esta etapa en una experiencia única y divertida, incluso en los momentos más difíciles.

De manera especial, quiero agradecer a Miguel, por su amor y apoyo inquebrantable a lo largo de esta etapa.

*Dennise Alejandra Rosero Zapata*

## Agradecimiento

---

A Dios, por ser mi refugio en los momentos más difíciles, por nunca dejarme sola y darme la resiliencia para superar cada obstáculo.

A mi abuela Rosa, por ser un modelo de fortaleza y valentía que me inspira. A mis padres, Iveth y Jorge, por su amor y apoyo constante, sin los cuales este logro no habría sido posible. A mis sobrinos Mateo, Ivanna y Anne, por ser mi mayor inspiración y recordarme con sus sonrisas que cada esfuerzo vale la pena.

A MSc. Jenny Venegas su apoyo y conocimientos fueron fundamentales para alcanzar esta meta. Y en especial a mi compañera, Dennise, por su paciencia incluso en los momentos más desafiantes.

*María Paz Calle Castro*

## Declaratoria Expresa

---

Nosotros, Dennise Alejandra Rosero Zapata y María Paz Calle Castro, acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 10 de octubre del 2024.



Dennise Alejandra  
Rosero Zapata



María Paz Calle Castro

## **Evaluadores**

---

**MSc. María Verónica Ordóñez**

Profesor de Materia

---

**MSc. Jenny Venegas**

Tutora de proyecto

## Resumen

La gestión de plásticos reciclados se presenta como una solución sostenible frente al impacto ambiental de los residuos plásticos y las demandas regulatorias. Sin embargo, en la empresa “Funditas”, el principal problema identificado es presencia de defectos en las fundas (variaciones de espesor, fallas de sellado y problemas de impresión), y por ende la generación del 40.88% de desperdicio por producción. Se identificó que la causa del problema es la ausencia de un sistema eficiente de clasificación, análisis de materiales reciclados y control de calidad en el reciclaje mecánico. Por lo tanto, en el presente proyecto se propone el diseño e implementación de un sistema de gestión de plásticos reciclados, basado en la ISO 15270: 2008, para la producción de fundas plásticas en la empresa, en cumplimiento con normativas ambientales de Ecuador, como la Ley Orgánica para la Reducción de Plásticos de un Solo Uso, que exige un mínimo de 60% de material reciclado en la formulación de la funda sin afectar a su calidad. El sistema incluye la clasificación visual de materiales, pelletizado, identificación fisicoquímica mediante los métodos de densidad, índice de fluidez y FTIR, evaluación de calidad y trazabilidad. Las pruebas piloto realizadas validaron que la solución propuesta mejora significativamente la calidad del producto evidenciada mediante pruebas mecánicas de las fundas (impacto al dardo y ensayo de tracción), reduce defectos y minimiza el desperdicio hasta en un 35,13% para materiales clasificados con la categoría A. Económicamente, la propuesta es viable, con un Valor Actual Neto positivo, una Tasa Interna de Retorno favorable del 31% y un periodo de recuperación de tres años. Este sistema mejora la calidad del reciclado, cumple con las normativas, reduce el impacto ambiental y fomenta la sostenibilidad de la empresa.

**Palabras clave:** Clasificación, Trazabilidad, Reducción de desperdicio, Viabilidad económica

## ***Abstract***

*The management of recycled plastics is presented as a sustainable solution to the environmental impact of plastic waste and regulatory demands. However, in the company “Funditas”, the main problem identified is the presence of defects in the covers (thickness variations, sealing failures and printing problems), and therefore the generation of 40.88% of waste per production. It was identified that the cause of the problem is the absence of an efficient system of classification, analysis of recycled materials and quality control in mechanical recycling. Therefore, in this project, the design and implementation of a management system for recycled plastics is proposed, based on ISO 15270: 2008, for the production of plastic covers in the company, in compliance with environmental regulations of Ecuador, such as the Organic Law for the Reduction of Single-Use Plastics, which requires a minimum of 60% recycled material in the formulation of the cover without affecting its quality. The system includes visual sorting of materials, pelletizing, physicochemical identification using density, flow rate and FTIR methods, quality assessment and traceability. The pilot tests carried out validated that the proposed solution significantly improves product quality as evidenced by mechanical testing of the casings (dart impact and tensile testing), reduces defects and minimizes waste by up to 35.13% for materials classified as category A.*

*Economically, the proposal is viable, with a positive Net Present Value, a favorable Internal Rate of Return of 31% and a payback period of three years. This system improves the quality of recycling, complies with regulations, reduces environmental impact and promotes the sustainability of the company.*

**Keywords:** *Classification, Traceability, Waste reduction, Economic feasibility.*

## Índice general

Resumen .....	I
<i>Abstract</i> .....	II
Abreviaturas .....	V
Simbología.....	VI
Índice de figuras .....	VII
Índice de tablas.....	IX
Capítulo 1 .....	1
1. Introducción.....	2
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Justificación del problema .....	4
1.4 Objetivos .....	6
1.4.1 <i>Objetivo General</i> .....	6
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	6
1.5 Marco Teórico.....	7
1.5.1 <i>Polietileno alta densidad</i> .....	7
1.5.2 <i>Polietileno baja densidad</i> .....	8
1.5.3 <i>Proceso de fabricación de funda plástica</i> .....	8
1.5.4 <i>Métodos de caracterización</i> .....	9
Capítulo 2 .....	12
2. Metodología.....	13
2.1 Identificación de la normativa aplicable .....	13
2.2 Diagnóstico de la empresa “Funditas”.....	13
2.2.1 <i>Caracterización de la empresa</i> .....	13
2.2.2 <i>Lista de verificación de la empresa</i> .....	14
2.3 Diseño del sistema de gestión .....	14

2.3.1	<i>Clasificación visual del material reciclado</i> .....	15
2.3.2	<i>Pelletizado</i> .....	16
2.3.3	<i>Identificación del material reciclado</i> .....	16
2.3.4	<i>Evaluación de la calidad</i> .....	20
2.3.5	<i>Disposición final</i> .....	21
2.3.6	<i>Trazabilidad</i> .....	21
2.4	Implementación y pruebas piloto.....	22
2.5	Análisis económico.....	25
Capítulo 3	.....	26
3.	Resultados .....	27
3.1	Diagnóstico de la empresa antes y después del sistema de gestión.....	27
3.2	Sistema de gestión .....	31
3.2.1	<i>Diseño e implementación del sistema de gestión</i> .....	31
3.3	Indicadores .....	51
3.3.1	<i>Resultados de las pruebas mecánicas</i> .....	51
3.3.2	<i>Reducción de desperdicio</i> .....	53
3.4	Económico.....	55
Capítulo 4	.....	58
4.	Capítulo 4.....	59
4.1	Conclusiones.....	59
4.2	Recomendaciones .....	60
4.3	Bibliografía.....	62

## Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PEAD	Polietileno de Alta Densidad
PEBD	Polietileno de Baja Densidad
MFI	Melt Flow Index
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
VAN	Valor Actual Neto.
TIR	Tasa Interna de Retorno.
PRI	Periodo de Recuperación de la Inversión.

## Simbología

mf	Masa de falla
cm	Centimetro
g	Gramos
MPa	Megapascal
kJ	Kilojulio
$\rho$	Densidad

## Índice de figuras

<b>Figura 1-1</b> <i>Valores de índice de fluidez en función del tipo de polietileno</i> .....	10
<b>Figura 1-2</b> <i>Bandas de absorción FTIR de BDPE y ADPE de material puro y reciclado</i> .....	11
<b>Figura 2-1</b> <i>Sistema de gestión de plásticos mediante reciclaje mecánico</i> .....	15
<b>Figura 2-2</b> <i>Ejemplo de muestras recolectadas para análisis</i> .....	17
<b>Figura 2-3</b> <i>Proceso de análisis de índice de fluidez.</i> .....	18
<b>Figura 2-4</b> <i>Plastómetro de la marca Dynisco, modelo LMFI-INNNNNN</i> .....	18
<b>Figura 2-5</b> <i>Balanza analítica con una precisión de 0,001 g</i> .....	19
<b>Figura 2-6</b> <i>Espectrómetro FTIR, marca Thermo Scientific</i> .....	20
<b>Figura 2-7</b> <i>Equipo impacto al dardo manual</i> .....	23
<b>Figura 2-8</b> <i>Dinamómetro digital, marca IMADA</i> .....	24
<b>Figura 2-9</b> <i>Medición de resistencia de sello de funda verde</i> .....	24
<b>Figura 3-1</b> <i>Diagrama de flujo de sistema de gestión propuesto</i> .....	32
<b>Figura 3-2</b> <i>Desperdicio generado en la empresa sim clasificación visual</i> .....	35
<b>Figura 3-3</b> <i>Desperdicio durante la aplicación de clasificación visual</i> .....	36
<b>Figura 3-4</b> <i>Desperdicio luego de clasificación visual</i> .....	36
<b>Figura 3-5</b> <i>Gráfico de barras de promedios de índice de fluidez por clasificación</i> .....	40
<b>Figura 3-6</b> <i>Gráfico de Caja y Bigote del índice de fluidez por clasificación</i> .....	41
<b>Figura 3-8</b> <i>Gráfico de absorbancia por longitud de onda de fundas verdes por clasificación</i> .....	42
<b>Figura 3-9</b> <i>Gráfico de absorbancia por longitud de onda de fundas grises por clasificación</i> .....	43
<b>Figura 3-10</b> <i>Gráfico de relación de absorbancia por FWHM de funda verde por clasificación</i> .....	44
<b>Figura 3-11</b> <i>Gráfico de relación de absorbancia por FWHM de funda gris por clasificación</i> .....	44
<b>Figura 3-12</b> <i>Gráfico de barras de promedios de densidad por clasificación</i> .....	46
<b>Figura 3-13</b> <i>Gráfico de Caja y Bigotes de densidad por clasificación</i> .....	47
<b>Figura 3-14</b> <i>Cuadro resumen de parámetros para la trazabilidad</i> .....	51
<b>Figura 3-15</b> <i>Gráfico de barras de ensayo de impacto al dardo de fundas verdes y grises</i> .....	52

<b>Figura 3-16</b> <i>Gráfico de barras de resistencia promedio del ensayo de tracción a los sellos de las fundas verde y gris .....</i>	53
--	----

## Índice de tablas

<b>Tabla 1-1</b> <i>Propiedades características del polietileno de alta densidad .....</i>	7
<b>Tabla 1-2</b> <i>Propiedades características del polietileno de baja densidad.....</i>	8
<b>Tabla 2-1</b> <i>Formato de lista de verificación aplicado a la empresa.....</i>	14
<b>Tabla 3-1</b> <i>Diagnóstico de la empresa antes del sistema de gestión .....</i>	27
<b>Tabla 3-2</b> <i>Diagnóstico de la empresa después del sistema de gestión .....</i>	29
<b>Tabla 3-3</b> <i>Clasificación para el proceso de Extrusión .....</i>	32
<b>Tabla 3-4</b> <i>Clasificación para el proceso de Impresión .....</i>	33
<b>Tabla 3-5</b> <i>Clasificación para el proceso de Sellado.....</i>	34
<b>Tabla 3-6</b> <i>Cantidad de desperdicio por proceso de funda tipo verde .....</i>	37
<b>Tabla 3-7</b> <i>Cantidad de desperdicio por proceso de funda tipo gris .....</i>	37
<b>Tabla 3-8</b> <i>Número de sacos de pellets clasificados por tipo de funda .....</i>	38
<b>Tabla 3-9</b> <i>Resumen de parámetros de calidad para evaluación de fundas a reciclar ..</i>	48
<b>Tabla 3-10</b> <i>Porcentajes de reducción de desperdicios en fundas tipo verde clasificadas .....</i>	54
<b>Tabla 3-11</b> <i>Porcentajes de reducción de desperdicios en fundas tipo gris clasificadas</i>	54
<b>Tabla 3-12</b> <i>Resultados de análisis económico.....</i>	57

# Capítulo 1

## **1. Introducción**

### **1.1 Descripción del problema**

La industria de fundas plásticas enfrenta actualmente el desafío de reducir la dependencia de materias primas vírgenes y aumentar el contenido de material reciclado, sin afectar la calidad en sus productos, en respuesta a regulaciones ante la creciente preocupación de la sociedad por el medio ambiente (Boz, 2022). En Ecuador, la Ley Orgánica para la reducción de plásticos de un solo uso exige que las fundas plásticas de acarreo, utilizadas por supermercados, contengan al menos 60% de material reciclado (Asamblea Nacional del Ecuador, 2020). Sin embargo, incorporar un alto porcentaje de material reciclado en mezclas de polietileno de alta densidad (PEAD) y polietileno de baja densidad (PEBD) conlleva serios problemas en el proceso de producción que se atribuye principalmente a la mezcla de plásticos incompatibles, impurezas y la falta de control de calidad del material reciclado (Boz, 2022).

En la empresa “Funditas”, donde se desarrolla el presente proyecto, el material reciclado utilizado proviene tanto de fuentes postindustriales como posconsumo. No obstante, actualmente la empresa tiene un sistema de control de calidad únicamente en el material posconsumo que compran a proveedores, más no del material postindustrial, resultante de sus mismos procesos. Además, existe una falta de clasificación y análisis del material reciclado en función de sus propiedades fisicoquímicas que contribuye a una alta variabilidad en las propiedades mecánicas de las fundas plásticas que provocan defectos visibles en las etapas de extrusión, sellado e impresión, generando un desperdicio significativo.

A partir de estos antecedentes, el presente proyecto apunta a diseñar e implementar en la empresa un sistema de gestión que conlleva la evaluación, clasificación y control de calidad del material reciclado, que cumpla con las disposiciones articuladas en el Acuerdo Ministerial 19 del Ecuador que estipula las Políticas para Gestión Integral de Plásticos del

Ecuador. Se hipotetiza que con este programa la selección del plástico reciclado a utilizar sea compatible en la mezcla con polietileno virgen y exista una mejora en las formulaciones. Este sistema busca reducir defectos en el proceso de fundas plásticas, mejorar la consistencia de las propiedades del producto final y reducir los desperdicios generados durante el proceso. Adicionalmente, se considerarán aspectos ambientales como el análisis del ciclo de vida del producto.

## **1.2 Planteamiento del problema**

La empresa “Funditas” fabrica fundas plásticas utilizando una mezcla que contiene entre un 70% y 80% de material reciclado, combinado con polietileno virgen de alta y baja densidad, para mejorar la compatibilidad de la mezcla. Esta práctica busca cumplir con la Ley Orgánica para la Racionalización, Reutilización y Reducción de Plásticos de un Solo Uso en Ecuador, vigente desde 2020, que establece que las fundas plásticas de acarreo deberán estar compuestas de al menos 60% de material reciclado, ya sea posconsumo o postindustrial (Asamblea Nacional del Ecuador, 2020). No obstante, la empresa enfrenta dificultades para cumplir completamente la normativa, ya que el producto final no mantiene la calidad requerida, lo que compromete la integridad de las fundas.

El principal problema identificado es la falta de una clasificación adecuada en la bodega de residuos postindustriales y posconsumo, y la ausencia de un análisis previo de los materiales reciclados antes de su reingreso al proceso productivo, específicamente del material postindustrial. Esta deficiencia empeora la situación, ya que no se tiene certeza sobre la calidad, composición o tipo de material que se está incorporando en la mezcla. La falta de un proceso de selección y clasificación rigurosa permite que materiales contaminados, con diferentes grados de degradación o propiedades incompatibles, se mezclen con el polietileno virgen, ya que, aunque exista la presencia de un aditivo para mejorar la compatibilidad, este no es suficiente para mejorar las propiedades mecánicas y rendimiento (Vilaplana and

Karlsson, 2008). Por ejemplo, ciertos residuos pueden tener puntos de fusión distintos o contener agentes contaminantes que generan acumulaciones y obstrucciones en los equipos de extrusión, los cuales operan a temperaturas específicas según el tipo de polietileno utilizado (Carvajal Quezada, 2016).

Estas irregularidades en la formulación de la mezcla afectan significativamente la calidad del producto final, manifestándose en defectos tales como variaciones en el espesor de la película, sellos débiles o discontinuos, y problemas en la impresión, donde la tinta no se adhiere correctamente a la superficie de las fundas plásticas. Estos defectos no solo comprometen el cumplimiento de los estándares legales, sino que también incrementan el desperdicio de materiales y la tasa de productos defectuosos (Kerps et al.,2022).

Además, la situación provoca interrupciones en el flujo de producción, generando demoras significativas que afectan los tiempos de entrega y la satisfacción del cliente. La combinación de estos factores incrementa los paros no programados y el mantenimiento de la maquinaria, elevando aún más los costos operativos y reduciendo la eficiencia del proceso. Esto no solo afecta la viabilidad económica de la empresa al incrementar los costos y reducir la productividad, sino que también deteriora su reputación en el mercado y disminuye su competitividad frente a otros fabricantes que logran mantener la calidad exigida con menor desperdicio y mayor consistencia en su producción.

### **1.3 Justificación del problema**

El presente proyecto propuesto para la empresa "Funditas" responde a la urgente necesidad de mejorar la calidad de sus fundas plásticas, que actualmente presentan defectos críticos debido al uso inadecuado del material reciclado (70- 80%) en la mezcla de polietileno de alta y baja densidad. Los problemas observados, como los ojos de pescado, variaciones en el espesor de la película y fallas en el sellado e impresión, no solo afectan la competitividad

de la empresa y la satisfacción del cliente, sino que también generan un impacto económico significativo debido al desperdicio de material.

En la producción actual, por cada 200 kg de fundas plásticas, se generan aproximadamente 50 kg de desperdicio, que se reintegra al proceso sin una clasificación ni análisis previos adecuados. Esto incrementa la incertidumbre sobre la calidad del material reciclado y, por ende, la calidad del producto final. Este proceso ineficiente no solo afecta la calidad, sino que también eleva los costos operativos debido a retrasos en la producción y retrabajo (Cámara de Comercio de Guayaquil, 2021).

La empresa debe cumplir con la Ley Orgánica para la Racionalización, Reutilización y Reducción de Plásticos de un Solo Uso, que exige que el producto final mantenga altos estándares de calidad, lo cual hace crucial una gestión de reciclaje eficiente para asegurar su viabilidad y competitividad. De igual forma, el Acuerdo Ministerial 19 de Ecuador establece lineamientos para la gestión del material reciclado, promoviendo la reducción de residuos y el aumento de producción a partir de materiales reutilizables y reciclados, excluyendo materiales perjudiciales para el medioambiente.

Ciertos lineamientos son: reducir la contaminación en sus procesos (Artículo 5), minimizar el impacto sobre los recursos naturales mediante reciclaje y eficiencia energética (Artículo 6), y realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) para evaluar y mitigar los impactos ambientales de sus productos (Artículo 8). Cumplir con estas regulaciones no solo es un requerimiento legal, sino también una estrategia para promover la sostenibilidad empresarial y reducir el impacto ambiental.

Este proyecto permitirá implementar un sistema de gestión del material reciclado, garantizando que el desperdicio reintroducido esté libre de contaminantes o defectos. Como resultado, se espera reducir significativamente la cantidad de desperdicio, mejorar la

eficiencia del proceso y disminuir los costos asociados a la producción defectuosa. Al mejorar la calidad del material reciclado, se reducirá la dependencia de materias primas vírgenes, disminuyendo la huella de carbono y otros impactos ambientales (WWF Ecuador, 2021). Además, desde una perspectiva social, esta investigación promoverá un uso más eficiente de los recursos plásticos y una mayor aceptación de productos fabricados a partir de reciclados, fortaleciendo la reputación de la empresa en un mercado que exige cumplimiento de normas ambientales.

La investigación contribuirá al conocimiento técnico y científico en el campo de la ingeniería de plásticos y reciclaje, especialmente en Ecuador, donde hay escasez de estudios sobre el impacto del material reciclado. Este proyecto generará nuevas prácticas industriales aplicables no solo a "Funditas." sino también a otras empresas del sector, mejorando la calidad y sostenibilidad en la producción de plásticos reciclados en el país (Plastivida, 2023).

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo General***

- Desarrollar un sistema de gestión de plásticos reciclados, analizando sus características fisicoquímicas antes y después del proceso, para la mejora de la calidad del producto final y la reducción del impacto económico en la producción de fundas plásticas.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- Diseñar un sistema de gestión para material reciclado, mediante una clasificación basada en la caracterización de sus propiedades físicas y químicas.
- Evaluar la eficiencia del sistema de gestión de plásticos reciclados durante su implementación utilizando indicadores clave.

- Realizar un análisis económico del proceso para la evaluación de la reducción de desperdicios generados.

## 1.5 Marco Teórico

### 1.5.1 Polietileno alta densidad

Entre los plásticos más utilizados en la actualidad se encuentran el polietileno de alta densidad (PEAD) y el polietileno de baja densidad (PEBD). El PEAD, conocido por su rigidez, resistencia química flexibilidad, transparencia cerosa, resistencia a la intemperie y tenacidad a bajas temperaturas. Además, es fácil de procesar mediante la mayoría de los métodos, lo que lo convierte en una opción rentable en la industria. Bednarik et al. (2016) detallaron ciertas propiedades que caracterizan al PEAD, las cuales se encuentran a continuación en la Tabla 1-1.

**Tabla 1-1**

*Propiedades características del polietileno de alta densidad*

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	0,955
Resistencia a la tracción [MPa]	27
Resistencia al impacto [kJ/m <sup>2</sup> ]	55

*Nota.* Datos obtenidos de Bednarik et al. (2016).

El PEAD también es conocido por su capacidad de reciclaje, ya que el material puede ser utilizado una y otra vez. Además, ofrece oportunidades para integrar material reciclado en la cadena de suministro, lo que contribuye a su sostenibilidad. Las investigaciones actuales indican que puede ser reciclado hasta en 10 ocasiones para la creación de nuevos productos (Rojas, 2023).

### 1.5.2 Polietileno baja densidad

Por otro lado, el polietileno de baja densidad (PEBD) es un tipo de plástico que puede ser transparente o translúcido. Se caracteriza por su flexibilidad, su capacidad para resistir sustancias químicas y su habilidad para impermeabilizar. Su baja densidad, junto con su alta resistencia, permite que las láminas delgadas de PEBD soporten cargas considerables, como se ve en las fundas de supermercado. Estas cualidades, sumadas a su bajo costo y capacidad de reciclaje, hacen del PEBD una opción sobresaliente para diversas aplicaciones que requieren una producción en gran volumen. (Rojas, 2023). Ciertas propiedades se enlistan en la Tabla 1-2.

**Tabla 1-2**

*Propiedades características del polietileno de baja densidad*

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	0,923
Resistencia a la tracción [MPa]	10.5
Resistencia al impacto [kJ/m <sup>2</sup> ]	286

*Nota.* Datos obtenidos de Bednarik et al. (2016).

### 1.5.3 Proceso de fabricación de funda plástica

El proceso para la elaboración de fundas plásticas consta de 3 etapas principales: extrusión, impresión y conversión. Esta última cuenta con 2 subetapas: sellado y perforación.

La extrusión mediante el método de película soplada implica extruir plástico fundido a través de un dado circular, creando un tubo continuo de material plástico. Posteriormente,

se enfría mediante aire y se expande inflando una burbuja de aire en su interior, lo que aumenta el ancho y ajusta el grosor de la película. Esta etapa permite la incorporación de aditivos personalizados para mejorar características como resistencia a rayos UV, deslizamiento, y estabilidad antioxidante (Carl Pirkle & Braatz, 2003).

El proceso siguiente es la impresión flexográfica, en la cual se aplica el diseño requerido por el cliente mediante planchas flexibles de impresión de fotopolímero que contienen la imagen en relieve negativo (Santos, 2022). Este tipo de impresión es común debido a su capacidad para imprimir en superficies no porosas como el plástico. Por último, los rollos impresos son convertidos en fundas tipo camiseta mediante el corte y sellado. El bloque sellador funciona mediante calor y realiza su proceso como si fuera una guillotina al entrar en contacto con un rodillo, este equipo se configura usualmente a una temperatura que se encuentra en el rango de 193.3 °C a 248.8°C, dependiendo del tipo de película que se vaya a cortar (Santos, 2022).

#### ***1.5.4 Métodos de caracterización***

Para asegurar la calidad del material reciclado utilizado en la producción de polímeros, es fundamental llevar a cabo diversas pruebas de caracterización que evalúan propiedades críticas del material. Estas pruebas incluyen análisis de densidad, índice de fluidez, y composición polimérica mediante FTIR. La densidad del material reciclado se mide para evaluar su pureza y grado de cristalización, aspectos que influyen directamente en sus propiedades mecánicas. La densidad junto con la espectrografía puede proporcionar información sobre la estructura interna del polímero y su posible contaminación con otros materiales.

El índice de fluidez (Melt Flow Index, MFI) se determina para conocer la viscosidad del polímero fundido, lo que es crucial para el procesado del material. Este índice se mide

siguiendo normas internacionales como ASTM D123. La prueba involucra extruir el polímero fundido a través de un orificio estándar bajo condiciones controladas de carga y temperatura, y se mide la cantidad de polímero que fluye en un tiempo determinado.

Un MFI más alto indica un material más fácil de procesar, pero también puede ser indicativo de menor peso molecular y, por ende, potencialmente menores propiedades mecánicas (Moustafa et al., 2021). AlMa'adeed, Mariam (2015) dispone de los valores de índice de fluidez dependiendo del tipo de polietileno, y se encuentran en la Figura 1-1.

### Figura 1-1

*Valores de índice de fluidez en función del tipo de polietileno*

Type of PE	Density (g cm <sup>-3</sup> )	Melt flow index (g/10 min)
HDPE	0.941–0.965	0.2–3.0
MDPE	0.926–0.940	1–2.0
LDPE	0.915–0.925	0.3–2.6
LLDPE	0.915–0.925	0.1–10.0
VLDPE	0.870–0.914	0.026–0.1

PE: polyethylene; HDPE: high-density polyethylene; LLDPE: linear low-density polyethylene; VLDPE: very low-density polyethylene; LDPE: low-density polyethylene; MDPE: medium-density polyethylene.

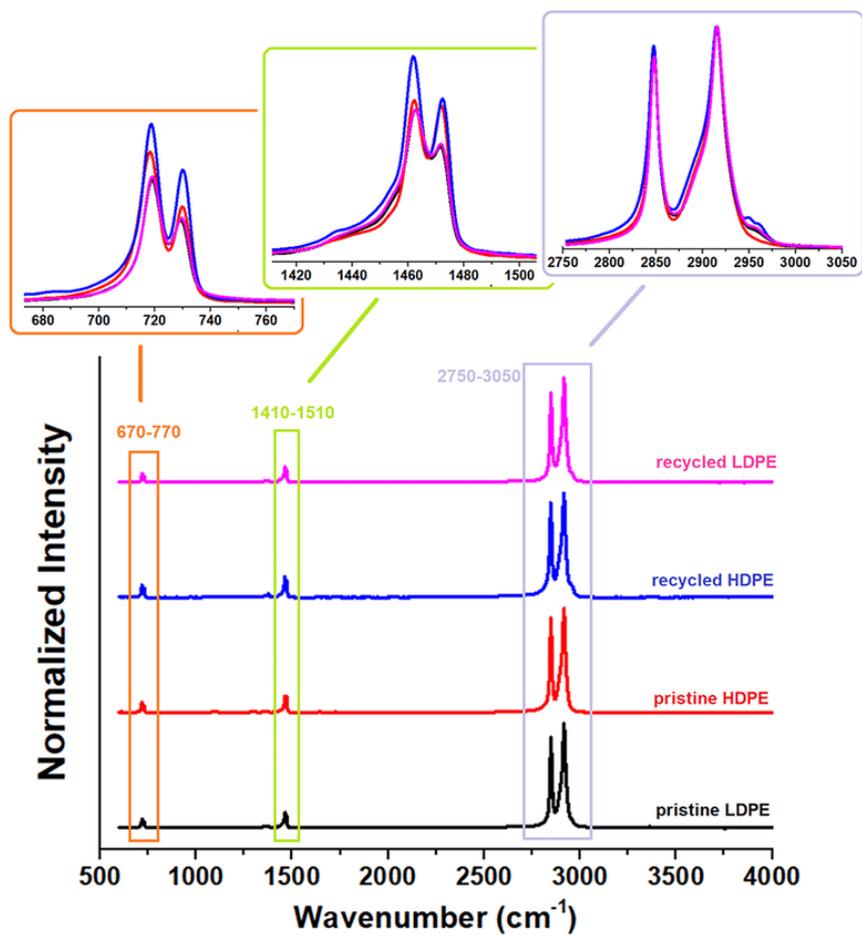
*Nota.* Figura obtenida de AlMa'adeed, Mariam (2015).

La composición polimérica se evalúa utilizando técnicas como la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Este método permite identificar la presencia de diferentes tipos de polímeros y aditivos dentro del material reciclado. FTIR es eficaz para detectar contaminantes o mezclas no deseadas en el polímero reciclado, asegurando que el material cumpla con los estándares necesarios para su reutilización en aplicaciones específicas (Ludaš Dujmić et al., 2024). Da Silva et al. (2022) presenta las bandas de

absorción que caracterizan al PEAD y al PEBD, en estado virgen y reciclado, como se puede observar en la Figura 1-2.

### Figura 1-2

*Bandas de absorción FTIR de LDPE y HDPE de material puro y reciclado*



*Nota.* Fuente obtenida de da Silva et al. (2022).

## Capítulo 2

## **2. Metodología**

### **2.1 Identificación de la normativa aplicable**

Se realizó una revisión exhaustiva de la normativa aplicable para diseñar el sistema de gestión de plásticos reciclados, enfocándose en la norma internacional ISO 15270:2008 y el Acuerdo Ministerial 19 del Ecuador. La norma ISO 15270:2008, emitida por la Organización Internacional de Normalización, proporciona lineamientos específicos para la recuperación y reciclaje de residuos plásticos, abordando rutas como el reciclaje mecánico, químico y biológico (ISO, 2008). A nivel nacional, el Acuerdo Ministerial 19 del Ecuador establece disposiciones para la gestión integral de plásticos, incluyendo la promoción del reciclaje y la reducción de residuos (Asamblea Nacional del Ecuador, 2020). En este proyecto, estas normativas sirvieron como base para diseñar un sistema de gestión que asegure el cumplimiento de estándares, mejorando la calidad del material reciclado y alineándolo con objetivos de sostenibilidad.

### **2.2 Diagnóstico de la empresa “Funditas”**

#### **2.2.1 Caracterización de la empresa**

Durante el periodo de un mes, se realizaron visitas a las instalaciones de la empresa para llevar a cabo entrevistas y diálogos con el personal responsable y los trabajadores involucrados en los procesos productivos. Estas interacciones permitieron identificar los procedimientos y métodos empleados por la organización, recopilando información clave para comprender las brechas existentes y los aspectos críticos que afectan la gestión actual del material reciclado. Este análisis proporcionó los antecedentes necesarios para el desarrollo del sistema de gestión propuesto en este proyecto.

### 2.2.2 *Lista de verificación de la empresa*

Con base en la normativa identificada previamente, incluyendo la ISO 15270 (2008) y el Acuerdo Ministerial 19 del Ecuador (2020), se diseñó una lista de verificación para evaluar el nivel de cumplimiento de la empresa con respecto a las regulaciones legales y sus requisitos. Esta herramienta permitió realizar un diagnóstico detallado de las prácticas actuales de la empresa, identificando oportunidades de mejora en áreas clave como la clasificación, trazabilidad y calidad del material reciclado. A continuación, en la tabla 2-1, se presenta el formato de la lista de verificación aplicada.

**Tabla 2-1**

*Formato de lista de verificación aplicado a la empresa*

Normativa		Título de la normativa	
Requisito/artículo	Descripción	Se cumple Si / No / No aplica	Observaciones

### 2.3 **Diseño del sistema de gestión**

El sistema de gestión para los plásticos reciclados se diseñó con base en el requisito 5.2.2 de la norma ISO 15270 (2008), el cual establece las unidades de operación necesarias para llevar a cabo el reciclaje mecánico de manera eficiente y conforme a estándares internacionales como se observa en la Figura 2-1. Este requisito se enfoca en garantizar la segregación, clasificación, procesamiento y control de calidad de los desechos plásticos, asegurando su viabilidad para ser reincorporados en el proceso productivo.

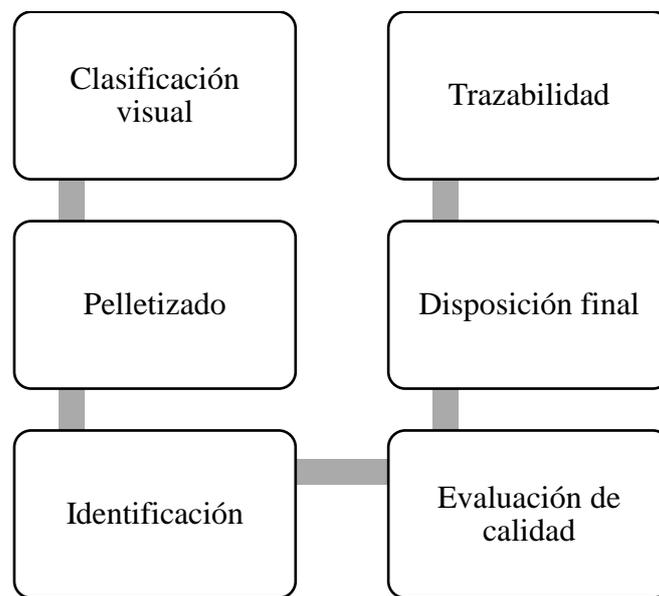
El objetivo del sistema fue obtener un material plástico reciclado con calidad suficiente para su reutilización en la fabricación de nuevos productos. Para lograrlo, fue fundamental implementar controles que permitieron garantizar que las propiedades

mecánicas, físicas y químicas del plástico reciclado sean comparables a las del plástico virgen.

Para el diseño del sistema también se consideró la trazabilidad del material en cada etapa del proceso, desde la clasificación inicial hasta su disposición final, lo que permitió un seguimiento detallado y aseguró la consistencia en la calidad del producto reciclado.

### Figura 2-1

*Sistema de gestión de plásticos mediante reciclaje mecánico*



*Nota.* Sistema de gestión adaptado de norma ISO 15270 (2008)

#### 2.3.1 *Clasificación visual del material reciclado*

La recolección de los plásticos se realizó en cumplimiento con el requisito 5.2.2.2 "Clasificación y Separación" de la norma ISO 15270:2008, el cual establece que los residuos deben ser recogidos en condiciones que permitan su manejo eficiente y sostenible, reduciendo al mínimo los contaminantes y facilitando su tratamiento en las etapas posteriores del reciclaje. En cumplimiento con este requisito, los materiales plásticos que salen del proceso como desperdicio (scrap), durante las etapas de producción (extrusión, impresión y

sellado/perforación) fueron recolectados en puntos de acopio designados dentro de las instalaciones de la empresa según el nivel de contaminación.

### **2.3.2 Pelletizado**

El proceso de pelletizado se llevó a cabo conforme a los requisitos establecidos en la norma ISO 15270 (2008) y el Acuerdo Ministerial 19 del Ecuador, los cuales recomiendan asegurar la calidad y uniformidad del material reciclado mediante controles específicos. Este proceso influyó etapas de trituración previa, fundido y extrusión, con parámetros estandarizados para garantizar que el producto final cumpliera con las propiedades mecánicas requeridas.

### **2.3.3 Identificación del material reciclado**

La identificación de los residuos recolectados se llevó a cabo mediante un proceso estructurado que incluye la selección de muestras representativas, su análisis y la verificación estadística de los resultados. Este procedimiento cumple con los lineamientos establecidos en el requisito 5.2.2.2(a) de la norma ISO 15270 (2008), que recomienda el uso de técnicas analíticas para garantizar una identificación precisa de los materiales

#### **2.3.3.1 Selección de muestras**

Para determinar las muestras necesarias para el análisis de los residuos, se utilizó el muestreo estratificado, un método que permite dividir la población total en subgrupos homogéneos o estratos, garantizando representatividad en cada uno de ellos. En este caso, la población estuvo constituida por los residuos recolectados en forma de pellets almacenados dentro de sacos de 40 kg.

Para seleccionar los sacos a muestrear, se utilizó el muestreo aleatorio simple, asignando un número único a cada saco y utilizando un generador de números aleatorios para realizar la selección. Este procedimiento está respaldado por métodos estadísticos descriptivos descritos en la literatura científica (Flick, 2018). En cada saco seleccionado, se

escogió muestras de 500 g de la parte inferior, media y superior del contenido, asegurando así la imparcialidad y consistencia de las muestras obtenidas.

### **Figura 2-2**

*Ejemplo de muestras recolectadas para análisis*



#### **2.3.3.2 Métodos de análisis**

##### **2.3.3.2.1 Índice de fluidez**

El índice de fluidez (MFI) se midió utilizando un plastómetro de la marca Dynisco, modelo LMFI-1NNNNNN, conforme a la norma ASTM D1238, para evaluar la procesabilidad de cada material. Se llevaron a cabo tres mediciones por cada saco seleccionado para aumentar la confiabilidad de los datos.

Se tomaron aproximadamente 3 gramos para cada muestra para luego ser introducidas en el barril del equipo, precalentado a 190°C, utilizando un peso estándar de 2.16 kg para generar la extrusión del material a través de un cabezal de 2.095 mm de diámetro. Tras descartar los primeros segmentos de material extruido, el flujo estable fue recolectado a intervalos regulares y pesado en una balanza de alta precisión. El MFI se calculó en unidades de g/10 min, relacionando la masa extruida con el tiempo de recolección.



El ensayo se realizó utilizando agua destilada a una temperatura controlada de 20-25 °C como líquido de referencia. Se midió la masa de la muestra en aire ( $A$ ) y luego sumergida en agua ( $B$ ), asegurándose de evitar burbujas adheridas. Se calculó la densidad ( $\rho_m$ ) usando la ecuación 2-1.

$$\rho_m = \frac{A}{A-B} \times \rho_l \quad (2-1)$$

donde  $\rho_l$  es la densidad del agua ajustada a la temperatura medida. Los resultados obtenidos se compararon con los rangos típicos del polietileno virgen permitiendo identificar materiales contaminados o incompatibles para su reincorporación al proceso productivo.

### Figura 2-5

*Balanza analítica con una precisión de 0,001 g*



#### 2.3.3.3 Espectroscopía FTIR

Se realizó el análisis por espectroscopia utilizando un espectrómetro FTIR, marca Thermo Scientific, calibrado para operar en un rango de 4000–400  $\text{cm}^{-1}$  con una resolución mínima de 4  $\text{cm}^{-1}$ , conforme a la norma ASTM E1252, como se observa en la figura 2-6. Este método asegura precisión en la identificación de componentes químicos. Las muestras analizadas fueron previamente limpiadas para eliminar residuos superficiales (polvo, aceites, entre otros), evitando interferencias en los resultados. Dado que este análisis es con fin

exploratorio, se realizó una medición por cada saco seleccionada. Cada muestra fue colocada en el porta muestras, y se realizaron al menos 2 escaneos por muestra para garantizar precisión en los datos. Los espectros obtenidos fueron analizados para identificar grupos funcionales clave.

Este procedimiento permitió evaluar la compatibilidad química y detectar posibles contaminantes en los materiales clave del sistema.

### **Figura 2-6**

*Espectrómetro FTIR, marca Thermo Scientific*



#### **2.3.4 Evaluación de la calidad**

La evaluación de calidad se llevó a cabo en cumplimiento con el requisito 6 de la norma ISO 15270 (2008), combinando métodos descriptivo y comparativo con el propósito de verificar que el material reciclado cumpliera con los estándares requeridos antes de su reincorporación al proceso productivo. El método descriptivo permitió caracterizar detalladamente las propiedades físicas y químicas de los materiales reciclados. Mientras que para el método comparativo se utilizó Python para el un análisis de varianza (ANOVA) como

herramienta estadística para identificar diferencias significativas entre los residuos recolectados en diferentes etapas del proceso, evaluando la homogeneidad de cada estrato.

Finalmente, los resultados obtenidos durante la identificación de los materiales reciclados fueron comparados con las propiedades de materiales vírgenes, garantizando que las características físicas y químicas fueran adecuadas para las aplicaciones previstas.

### **2.3.5 Disposición final**

La disposición final de los materiales se definió en cumplimiento con el requisito 6.2 de la norma ISO 15270:2008 y los Artículos 17, 19 y 24 del Acuerdo Ministerial 19 del Ecuador. Por lo tanto, los lotes de pelletizado que cumplieron con los estándares de calidad fueron destinados a su reincorporación directa en el proceso productivo. Los lotes con desviaciones moderadas fueron sometidos a un reprocesamiento interno o en formulaciones para fundas con menor exigencia. Finalmente, los lotes no conformes que no cumplieron con estándares mínimos fueron gestionados mediante reciclaje externo o disposición controlada en instalaciones autorizadas, garantizando el cumplimiento de las regulaciones ambientales.

### **2.3.6 Trazabilidad**

Cada lote fue identificado con un código único que incluyó información sobre el origen, identificación de material, clasificación, evaluación de calidad y disposición final, según se establece en el requisito 5.2.2 de la norma ISO 15270 (2008) que especifica la necesidad de identificar, clasificar y manejar los materiales reciclados de manera eficiente, asegurando su trazabilidad en todas las etapas del proceso, desde la recolección hasta su disposición final.

Toda esta información fue registrada manualmente en un sistema centralizado (registro manual), que permitió monitorear el historial de cada lote desde su recolección hasta su reincorporación o reciclaje externo. Este registro incluyó detalles como las pruebas

realizadas (densidad, índice de fluidez, FTIR), los resultados obtenidos y las acciones implementadas para garantizar la calidad y sostenibilidad del sistema de gestión.

#### **2.4 Implementación y pruebas piloto**

La implementación del diseño se llevó a cabo utilizando 100 kg de material reciclado con misma formulación base empleada en el proceso antes de la clasificación. Esta etapa se la realizó bajo dos condiciones experimentales: material clasificado como A y material clasificado como B, asegurando la viabilidad de cada proceso y simulando condiciones reales de operación. El objetivo principal fue evaluar el impacto de la clasificación previa sobre la calidad de las fundas producidas mediante pruebas mecánicas y la reducción de desperdicio en comparación con el proceso sin clasificación

Estas pruebas incluyeron la prueba de impacto al dardo según la norma ASTM D1709, que determinó la resistencia del material a impactos directos, en la cual se realizó 10 mediciones para cada clasificación para garantizar la representatividad y confiabilidad de los resultados. En la figura 2-7 se observa el equipo utilizado.

**Figura 2-7**

*Equipo impacto al dardo manual*



Asimismo, la prueba de tracción, basada en la norma ASTM F88, que analizó la resistencia de las áreas selladas bajo tensión. Se realizaron 5 mediciones en los sellos del asa y 5 mediciones en los sellos del fondo por cada condición experimental en el equipo de dinamómetro digital marca IMADA, como se observa en la figura 2-8.

**Figura 2-8***Dinanómetro digital, marca IMADA***Figura 2-9***Medición de resistencia de sello de funda verde*

Para evaluar la efectividad del sistema también se cuantificó la reducción de desperdicio en cada condición mediante la ecuación 2.1, con el fin de comparar los porcentajes de desperdicios generados en el proceso sin clasificar y en procesos con clasificación, como se observa en la ecuación 2.2. Este análisis incluyó la medición de la cantidad de material ingresado al proceso, el desperdicio generado en cada etapa de producción y el total al finalizar el proceso de producción.

$$\frac{\text{Desperdicio inicial} - \text{Desperdicio final}}{\text{Desperdicio inicial}} \times 100\% \quad (2.1)$$

$$\frac{\% \text{ Desperdicio sin clasificación} - \% \text{ Desperdicio con clasificación}}{\% \text{ Desperdicio sin clasificación}} \quad (2.2)$$

## 2.5 Análisis económico

La metodología del análisis económico se centrará en tres etapas clave: identificación de costos actuales, estimación de costos asociados a la solución propuesta y evaluación de beneficios económicos. Primero, se determinarán los costos actuales derivados de los defectos de calidad en la producción de bolsas plásticas, tales como desperdicio de material, retrabajos y paradas de máquina. Esta etapa se apoyará en datos históricos y estimaciones sobre la cantidad de desperdicio y la producción perdida.

Luego, se calcularán los costos de implementación de la propuesta de solución, que incluyen la adquisición de equipos de análisis, capacitación del personal y ajustes necesarios en la producción para incorporar el nuevo sistema de clasificación. Finalmente, se estimarán los beneficios que se derivarán de la mejora en la calidad del producto, reducción de desperdicio, aumento de la productividad y cumplimiento con normativas ambientales. Los beneficios se cuantificarán en términos de ahorro en materiales, reducción de retrabajos, optimización del uso de energía y posibles incrementos en ventas debido a la mejora en la calidad.

El análisis se completará mediante el cálculo de indicadores financieros como el valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y periodo de recuperación de la inversión (PRI), utilizando un horizonte temporal de 3 años. Esto proporcionará una evaluación clara de la viabilidad económica de la propuesta, permitiendo tomar decisiones informadas sobre su implementación dentro del plazo de tres meses del proyecto.

## Capítulo 3

### 3. Resultados

#### 3.1 Diagnóstico de la empresa antes y después del sistema de gestión

Antes de implementar el sistema de gestión propuesto, se evaluó el cumplimiento de los requisitos normativos aplicables a los procesos de manejo y reciclaje de materiales plásticos en la situación inicial, como se describe en la tabla 3-1. Este análisis permitió identificar las brechas y áreas de mejora necesarias para garantizar el alineamiento con las disposiciones de la norma ISO 15270:2008 Y el Acuerdo Ministerial 19.

**Tabla 3-1**

*Diagnóstico de la empresa antes del sistema de gestión*

<b>Normativa</b>	<b>Requisito/ artículo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cumple</b>	<b>Observaciones</b>
ISO 15270: 2008	5.1.3	Trazabilidad de los materiales reciclados en todas las etapas del proceso.	No	No se contaba con un sistema formal de trazabilidad, lo que dificultaba el seguimiento de los materiales reciclados.
ISO 15270: 2008	5.2.2	Clasificación y separación de materiales plásticos según niveles de contaminación.	No	No se realizaba una clasificación formal, lo que ocasionaba mezclas no deseadas en el proceso de reciclaje.
ISO 15270: 2008	5.3	Minimización de contaminantes para	No	Los materiales eran reciclados sin proceso previo

		mejorar la calidad del reciclado.		de limpieza o separación de contaminantes
ISO 15270: 2008	6.2	Manejo de materiales altamente contaminados mediante reciclaje químico o disposición final.	No	Los materiales altamente contaminados eran desechados sin tratamiento adicional
ISO 15270: 2008	6.3	Evaluación de calidad para garantizar estándares en el material reciclado.	No	No se realizaban pruebas de calidad del material postindustrial, lo que limitaba las propiedades del material reciclado
Acuerdo Ministerial 19	Art. 17	Evaluación de materiales plásticos reciclados para su aptitud en reciclaje mecánico o químico	No	
Acuerdo Ministerial 19	Art. 19	Clasificación por tipo de resina y nivel de contaminación.	No	Se generaba inconsistencias en la calidad final
Acuerdo Ministerial 19	Art. 24	Uso de métodos alternativos (tratamiento químico,	No	No se implementaban métodos alternativos para materiales no reciclables

---

inertización) para  
 materiales no aptos  
 para reciclaje  
 mecánico.

Una vez implementado el sistema de gestión, se realizó una nueva evaluación para verificar el cumplimiento de los requisitos normativos, como se describe en la tabla 3-2. Este análisis permitió observar mejoras significativas en la trazabilidad, clasificación, y manejo de los materiales reciclados, así como en la implementación de controles de calidad.

**Tabla 3-2**

*Diagnóstico de la empresa después del sistema de gestión*

<b>Normativa</b>	<b>Requisito/ artículo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cumple</b>	<b>Observaciones</b>
ISO 15270: 2008	5.1.3	Trazabilidad de los materiales reciclados en todas las etapas del proceso.	Sí	Se implementó un sistema centralizado manual para registrar desde el origen hasta la disposición final.
ISO 15270: 2008	5.2.2	Clasificación y separación de materiales plásticos según niveles de contaminación	Sí	Los materiales fueron clasificados en A, B y C según defectos y contaminación.
ISO 15270: 2008	5.3	Minimización de contaminantes para	Sí	Se redujeron contaminantes mediante separación previa al reprocesamiento.

		mejorar la calidad del reciclado.		
ISO 15270: 2008	6.2	Manejo de materiales altamente contaminados mediante reciclaje químico o disposición final.	No	Los materiales no aptos fueron enviados a disposición final sin aplicar reciclaje químico por limitaciones tecnológicas.
ISO 15270: 2008	6.3	Evaluación de calidad para garantizar estándares en el material reciclado.	Sí	Se realizaron pruebas de índice de fluidez, densidad, FTIR, impacto al dardo y tracción del sello para evaluar propiedades físicas, químicas y mecánicas.
Acuerdo Ministerial 19	Art. 17	Evaluación de materiales plásticos reciclados para su aptitud en reciclaje mecánico o químico	Sí	Se determinó la aptitud de los materiales mediante pruebas de calidad para su reincorporación o disposición final
Acuerdo Ministerial 19	Art. 19	Clasificación por tipo de resina y nivel de contaminación.	Sí	Se implementó un sistema de clasificación visual para separar materiales según nivel de contaminación.

---

Acuerdo Ministerial 19	Art. 24	Uso de métodos alternativos (tratamiento químico, inertización) para materiales no aptos para reciclaje mecánico.	No se implementaban métodos alternativos para materiales no reciclables por falta de infraestructura.
------------------------	---------	---	---

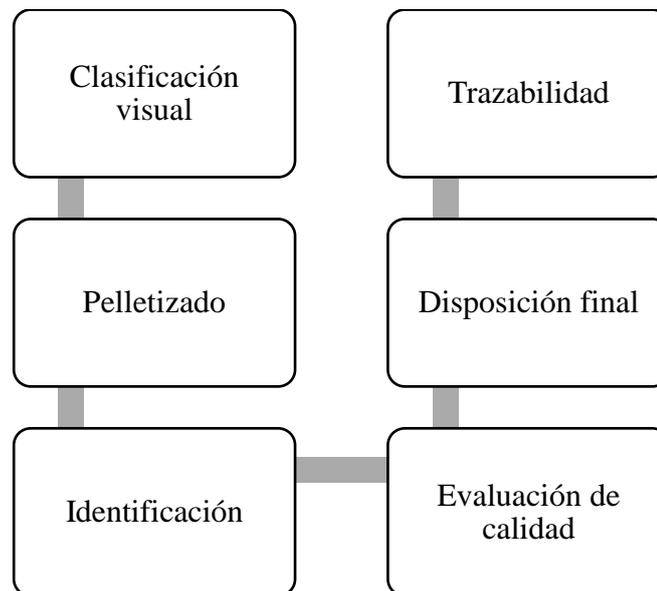
## 3.2 Sistema de gestión

### 3.2.1 *Diseño e implementación del sistema de gestión*

El diseño de un sistema de gestión del material reciclado buscó mejorar el manejo de desechos plásticos para maximizar su aprovechamiento, garantizar la calidad y trazabilidad del material reciclado y cumplir con normativas nacionales e internacionales. Su objetivo principal fue reincorporar eficientemente los materiales reciclados al proceso productivo o gestionarlos de manera responsable, asegurando el cumplimiento de los estándares de calidad. La estructura del sistema se presenta en un diagrama de flujo en la Figura 3-1.

**Figura 3-1**

*Diagrama de flujo de sistema de gestión propuesto*



### 3.2.1.1 Clasificación visual

Se realizó una clasificación visual de los materiales recolectados en las etapas de extrusión, impresión y sellado, evaluando sus defectos y niveles de contaminación. Esta clasificación permitió agrupar los materiales según su calidad inicial en tres categorías: A (defectos menores), B (defectos moderados) y C (defectos severos). En las tablas a continuación, se recopilan los defectos por proceso.

**Tabla 3-3**

*Clasificación para el proceso de Extrusión*

A	B	C
Espesor irregular: Variación mínima que no compromete la integridad estructural.	Burbujas moderadas: Mayor densidad de burbujas o tamaño entre 2-5 mm.	Quemaduras: Zonas negras o marrones causadas por altas temperaturas.

Burbujas pequeñas: Pocas burbujas de tamaño inferior a 2 mm distribuidas en la película.	Ondulaciones: Presencia de zonas deformadas, pero aún utilizables tras reprocesamiento.	Desgarros severos: Película rota o agrietada. Burbujas grandes: Mayor a 5 mm, distribuidas en la superficie.
Sin partículas visibles (polvo, fibras, suciedad). Sin manchas, quemaduras o material degradado.	Polvo o fibras visibles que no afectan significativamente el reprocesamiento.	Manchas visibles: Restos de aceite, grasas, pintura, o residuos extraños incrustados.

**Tabla 3-4***Clasificación para el proceso de Impresión*

A	B	C
Desalineación mínima de colores: No mayor a 1 mm entre capas.	Desalineación moderada: Entre 1-3 mm de diferencia entre capas.	Registro perdido: Desalineación mayor a 3 mm entre colores o líneas.
Sin exceso de tinta o derrames.	Zonas con tinta en exceso o borrosidad leve.	Manchas grandes o goteo que contamina áreas extensas.

Superficie sin contaminantes visibles, sin raspaduras ni manchas en áreas críticas.	Ligeras manchas de polvo o tinta fuera de las áreas impresas principales.	Áreas con tinta extendida fuera del diseño, imposibles de limpiar.
---	---	--

**Tabla 3-5***Clasificación para el proceso de Sellado*

A	B	C
Bordes débiles: Sellados con fuerza baja pero funcionales.	Bordes parcialmente abiertos: Hasta un 20% del borde sin sellar.	Bordes quemados o endurecidos que afectan la integridad del material.
Desalineación mínima: Hasta 1 mm de diferencia en el borde del sellado.	Deformaciones visibles: Arrugas o pliegues en el área de sellado.	Fundas completamente abiertas o con desgarres.
Material limpio, sin restos de aceite o partículas visibles	Polvo o suciedad en los bordes, pero sin penetrar profundamente en el material	Restos de grasa, aceites u otros contaminantes en el área de sellado que inutilizan el material.

Se evidencia mediante la figura 3-2 la situación en la que se encontraba la empresa con respecto a la generación de desperdicios sin clasificar.

**Figura 3-2**

*Desperdicio generado en la empresa sin clasificación visual*



En la figura 3-3 se observa el proceso de clasificación visual a los desperdicios generados por proceso.

**Figura 3-3**

*Desperdicio durante la aplicación de clasificación visual*



Por último, se evidencia en la figura 3-4 el desperdicio clasificado.

**Figura 3-4**

*Desperdicio luego de clasificación visual*



De 4740 kg producidos para la producción de fundas de supermercado tipo verde sin clasificación se obtuvieron los siguientes resultados descritos en la Tabla 3-6.

**Tabla 3-6**

*Cantidad de desperdicio por proceso de funda tipo verde*

<b>Proceso</b>	<b>Clase A (kg)</b>	<b>Clase B (kg)</b>	<b>Clase C (kg)</b>	<b>Total</b>
<b>Extrusión</b>	300	130	47	477
<b>Impresión</b>	104	50	20	174
<b>Sellado</b>	836,65	310	140	1286,65
<b>Total (kg)</b>	1240,65	490	207	1937,65
<b>Porcentaje (%)</b>	64,03	25,29	10,68	100,00

Los resultados muestran que la mayor parte del material (64.03%) corresponde a la Clase A, mientras que las Clases B y C representan un 25,29% y 10,68%, respectivamente. Esto refleja una mezcla heterogénea de materiales, donde un porcentaje considerable presenta defectos moderados o severos que requerirían tratamiento adicional o disposición final.

Mientras que, de los 3480 kg producidos para la funda de supermercado tipo gris se obtuvieron los siguientes resultados descritos en la tabla 3-7.

**Tabla 3-7**

*Cantidad de desperdicio por proceso de funda tipo gris*

<b>Proceso</b>	<b>Clase A (kg)</b>	<b>Clase B (kg)</b>	<b>Clase C (kg)</b>	<b>Total</b>
<b>Extrusión</b>	473	126	31	630
<b>Impresión</b>	147,5	39	10	196,5

<b>Sellado</b>	700	236,2	115	1051,2
<b>Total (kg)</b>	1320,5	401,2	156	1877,7
<b>Porcentaje (%)</b>	70,33	21,37	8,31	100,00

Este análisis reveló que la mayoría del material reciclado (70,33%) correspondía a la Clase A, con defectos menores que no comprometían la calidad del producto. Sin embargo, un 21,37% del material se clasificó en Clase B, reflejando defectos moderados que requerían reprocesamiento, mientras que un 8,31% se agrupó en Clase C debido a defectos severos o contaminación significativa. Los resultados por etapa muestran una mayor proporción de defectos en la impresión y el sellado, lo que sugiere áreas de oportunidad para optimizar estos procesos.

### 3.2.1.2 Pelletizado

Para el proceso de pelletizado, únicamente se consideraron los materiales clasificados en las categorías A y B, ya que presentaban propiedades adecuadas para su reprocesamiento y reincorporación al sistema productivo. Los materiales fueron procesados y empacados en sacos de 25 kg, garantizando trazabilidad y facilidad de manejo en las etapas posteriores. Los resultados obtenidos descritos en la Tabla 3-8 reflejan la distribución del material pelletizado por categoría.

**Tabla 3-8**

*Número de sacos de pellets clasificados por tipo de funda*

	<b>Clase A</b>	<b>Clase B</b>
<b>Número de sacos (pellet verde)</b>	50	20
<b>Número de sacos (pellet gris)</b>	53	16

### 3.2.1.3 Identificación

El proceso de identificación se realizó mediante pruebas de índice de fluidez, densidad y FTIR, utilizando las muestras obtenidas de los sacos de material pelletizado en ambas categorías (Clase A y Clase B). Las pruebas de índice de fluidez y densidad se realizaron con mayor frecuencia debido a su importancia para evaluar las propiedades físicas del material, mientras que el análisis FTIR tuvo un enfoque exploratorio, lo que justificó la realización de solo un análisis por saco.

#### 3.2.1.3.1 Resultados de índice de fluidez

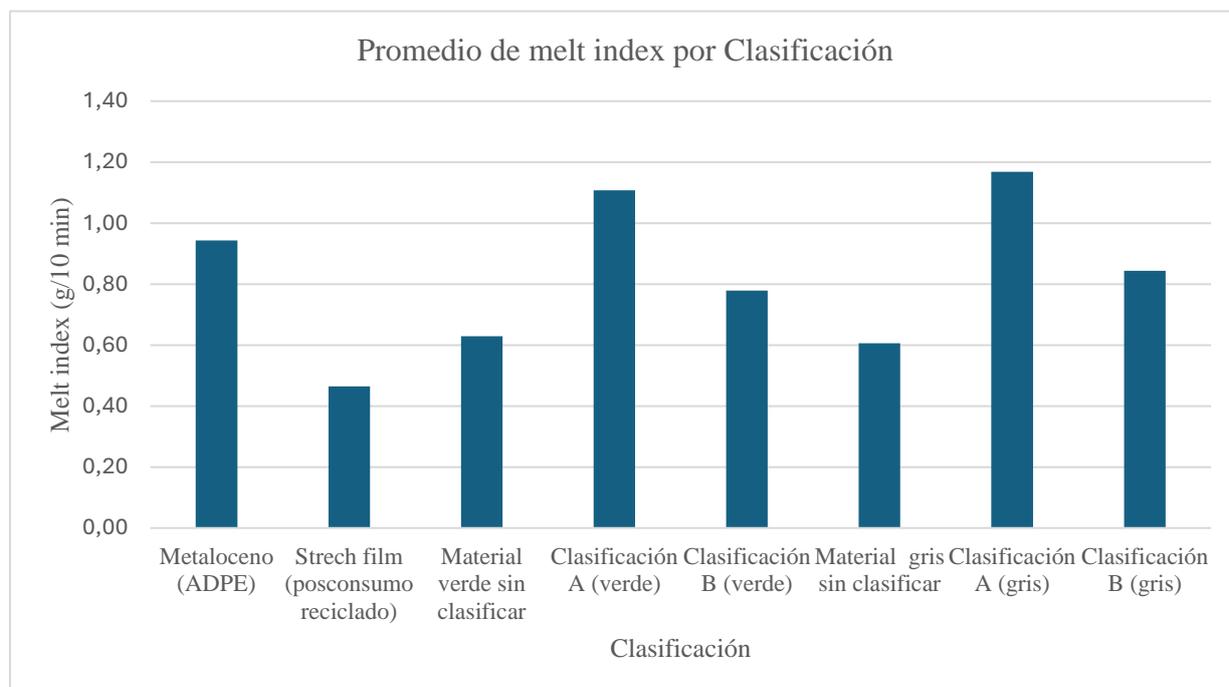
El análisis del Índice de fluidez se realizó para evaluar las propiedades de flujo de los materiales reciclados bajo diferentes clasificaciones y niveles de contaminación. Este parámetro es esencial para determinar la viabilidad de los materiales reciclados en aplicaciones específicas y garantizar su reincorporación al sistema productivo. Los resultados se presentan en dos gráficas principales: promedios del Índice de fluidez y un gráfico de caja y bigotes, que muestra la dispersión y variabilidad de los datos.

En la Figura 3-5 se presentan los promedios del Índice de fluidez para las diferentes muestras analizadas, incluyendo material virgen ADPE (metaloceno) y material posconsumo comprado que simula ser BDPE (Strech Film), desperdicios sin clasificar (verde y gris) y los materiales clasificados en A y B. Los materiales Clasificación A (verde y gris) presentaron los valores más altos y consistentes, oscilando entre 1,10-1,20 g/10 min, reflejando una menor contaminación y mejor calidad. En contraste, los materiales de Clasificación B mostraron valores intermedios (0,75-0,91 g/10 min), con una ligera mayor dispersión debido a defectos moderados. Los materiales sin clasificar presentaron los valores más bajos (0,60-0,70 g/10 min), debido a que se identificó que en la pelletización se mezclaba material que

contenía BDPE al ser también de color verde. Es por esto que se destaca la importancia de la clasificación inicial para reducir variabilidad y mejorar la calidad.

### Figura 3-5

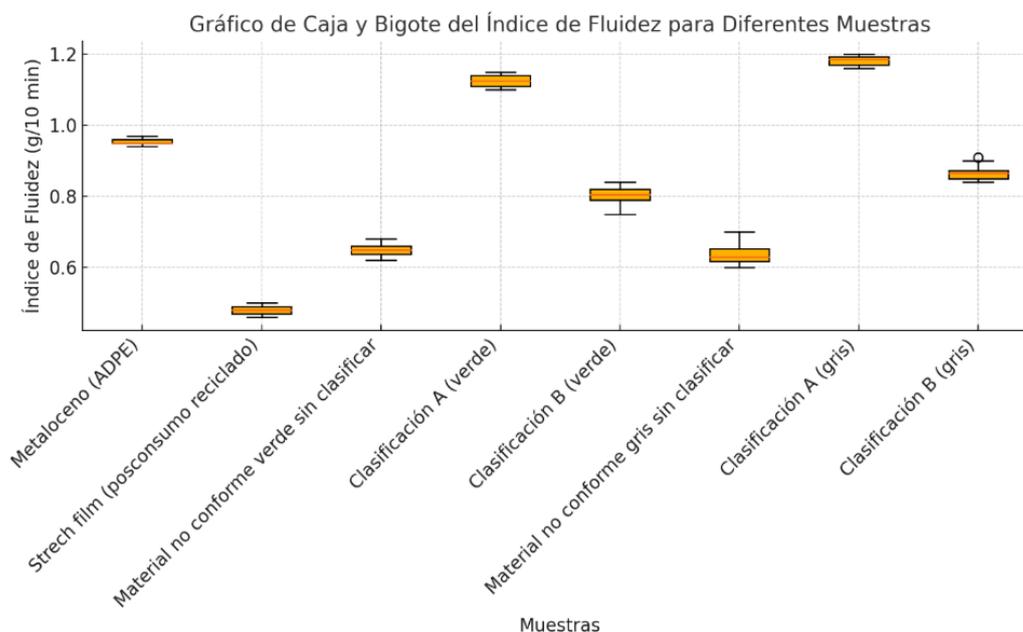
*Gráfico de barras de promedios de índice de fluidez por clasificación*



En la Figura 3-6 se observa gráfico de caja y bigotes que detalla la dispersión de los valores de Índice de fluidez en cada muestra. Las categorías de Clasificación A (verde y gris) tuvieron la menor dispersión, lo que indica una mayor uniformidad en sus propiedades, mientras que los materiales sin clasificar mostraron mayor variabilidad, asociada a la mezcla heterogénea de contaminantes y defectos. Los materiales base (Metaloceno y Stretch Film) presentaron valores consistentes, ya que son adquiridos por proveedores externos con las propiedades ya establecidas, sirviendo como referencia para evaluar el comportamiento de los materiales reciclados.

**Figura 3-6**

*Gráfico de Caja y Bigote del índice de fluidez por clasificación*



Se realizó un análisis ANOVA usando la herramienta Python para determinar si existían diferencias significativas entre los grupos analizados. Los resultados del ANOVA indicaron un estadístico F de 1314,45 y un p-valor de  $6,47 \times 10^{-75}$ , confirmando diferencias estadísticamente significativas entre las muestras. Esto evidencia que el nivel de contaminación y la clasificación previa tienen un impacto directo en las propiedades de flujo de los materiales reciclados.

### 3.2.1.3.2 Resultados de FTIR

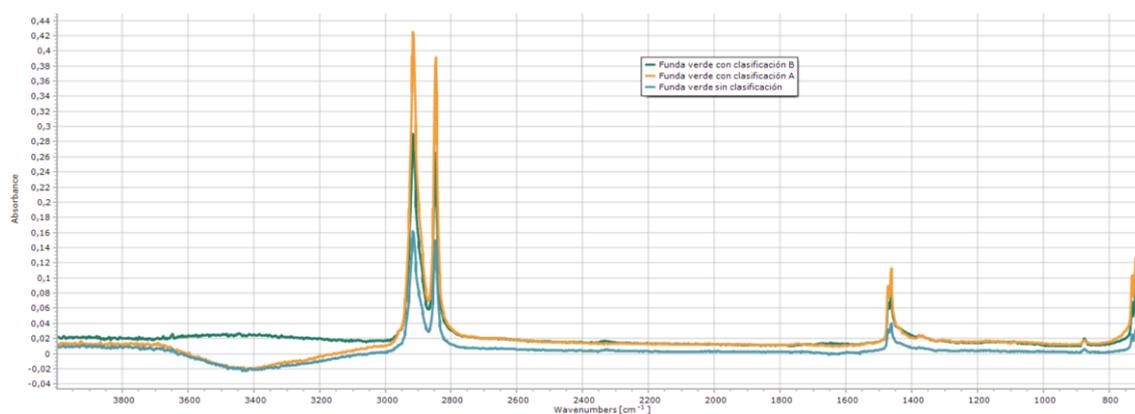
El análisis FTIR permitió evaluar la composición química de los materiales reciclados mediante la comparación con el espectro de referencia de ADPE. El espectro de ADPE mostró picos característicos en  $2919 \text{ cm}^{-1}$  y  $2850 \text{ cm}^{-1}$ , correspondientes al stretching asimétrico y simétrico de C-H, respectivamente, así como bandas en  $1472 \text{ cm}^{-1}$  y  $1464 \text{ cm}^{-1}$  asociadas a la deformación de  $\text{CH}_2$  y señales en  $730 \text{ cm}^{-1}$  y  $720 \text{ cm}^{-1}$  correspondientes al rocking de  $\text{CH}_2$ . Este perfil limpio y definido sirvió como base para evaluar la calidad de los

materiales reciclados, diferenciando claramente los niveles de contaminación en función de su clasificación.

En las muestras verdes, descritas en la Figura 3-8, se observaron diferencias significativas entre las categorías analizadas. Las muestras sin clasificar mostraron picos de ADPE en  $2919\text{ cm}^{-1}$  y  $2850\text{ cm}^{-1}$ , aunque con menor intensidad, lo que sugiere una mayor presencia de contaminantes. Además, se detectaron señales adicionales en  $1720\text{ cm}^{-1}$ , indicativas de carbonilos, asociadas a procesos de degradación u oxidación del material. En contraste, las muestras clasificadas como A presentaron espectros más limpios, con picos intensos y definidos en las mismas bandas características de ADPE y ausencia de señales significativas en  $1720\text{ cm}^{-1}$ , reflejando una alta calidad química. Las muestras clasificadas como B también mostraron los picos de ADPE, pero con menor intensidad en comparación con la Clasificación A, junto con leves señales en  $1720\text{ cm}^{-1}$  que indican la presencia de trazas de contaminantes.

### Figura 3-7

*Gráfico de absorbancia por longitud de onda de fundas verdes por clasificación*

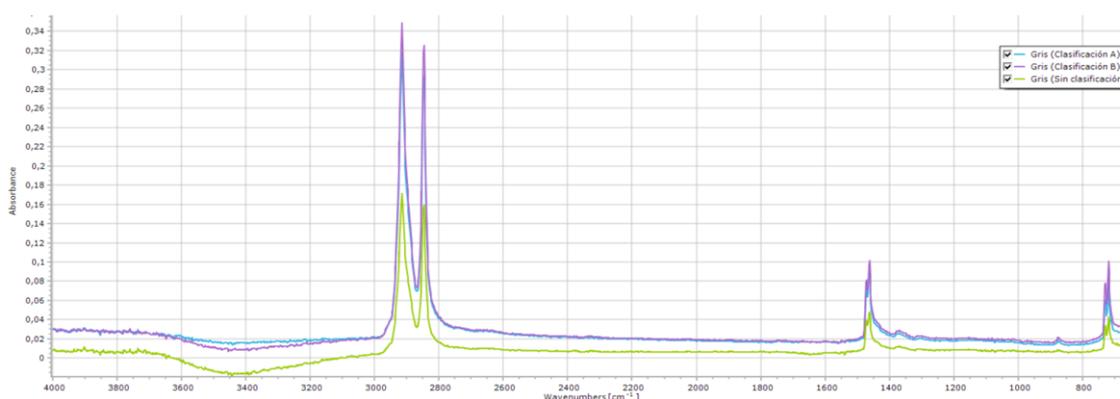


*Nota.* El espectro naranja corresponde a la señal de la funda verde con categoría A, el espectro verde a la categoría B y el espectro celeste sin categoría.

De manera similar, como se observa en la Figura 3-9, las muestras grises reflejaron un comportamiento paralelo a las verdes. Las muestras sin clasificar presentaron señales de carbonilos en  $1720\text{ cm}^{-1}$  y una menor definición en los picos de CH en  $2919\text{ cm}^{-1}$  y  $2850\text{ cm}^{-1}$ , lo que evidencia una mayor heterogeneidad química. Por otro lado, las muestras clasificadas como A mostraron espectros similares al ADPE, con picos definidos y ausencia de contaminantes significativos, demostrando una calidad superior adecuada para aplicaciones exigentes. Las muestras clasificadas como B presentaron un comportamiento intermedio, con menor intensidad en los picos de ADPE y señales leves de contaminantes, limitando su uso en aplicaciones de alta exigencia.

### Figura 3-8

*Gráfico de absorbancia por longitud de onda de fundas grises por clasificación*



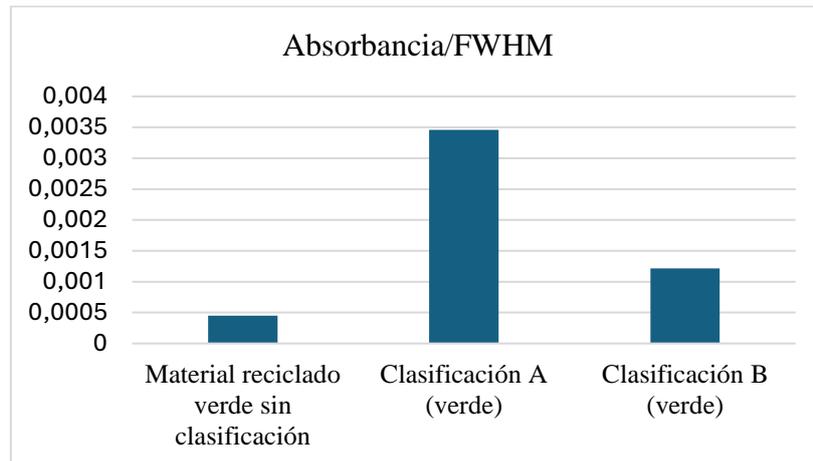
*Nota.* El espectro celeste corresponde a la señal de la funda gris con categoría A, el espectro morado a la categoría B y el espectro verde sin categoría.

Para cuantificar la calidad espectral, se calculó la relación absorbancia/FWHM (Full Width at Half Maximum), como se evidencia en la Figura 3-10 para fundas verdes y en la Figura 3-11 para fundas grises. Las muestras clasificadas como A (verde y gris) presentaron relaciones altas, lo que indica mayor pureza y menor dispersión espectral. Las muestras clasificadas como B mostraron una relación intermedia, reflejando una calidad aceptable, aunque con

mayor dispersión. Finalmente, las muestras sin clasificar presentaron las relaciones más bajas, confirmando su heterogeneidad y la presencia de contaminantes.

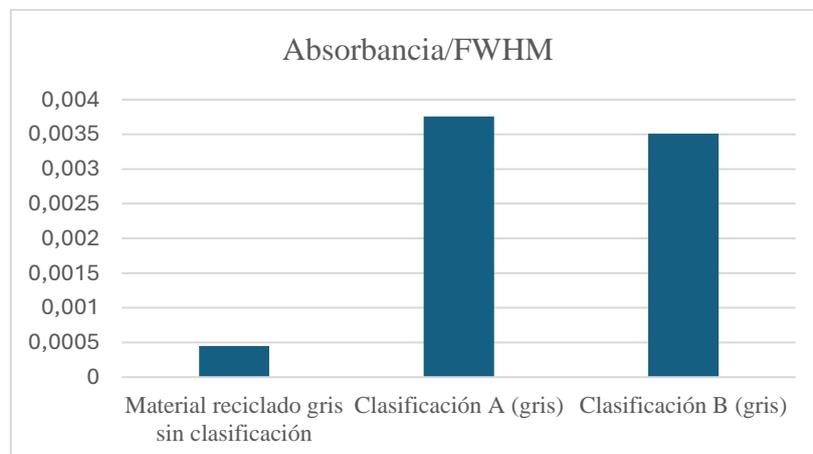
### Figura 3-9

*Gráfico de relación de absorbanza por FWHM de funda verde por clasificación*



### Figura 3-10

*Gráfico de relación de absorbanza por FWHM de funda gris por clasificación*



Este análisis demuestra que el sistema de clasificación inicial es crucial para optimizar la calidad de los materiales reciclados, permitiendo que las muestras clasificadas como A presenten características comparables a los estándares del ADPE, mientras que las muestras clasificadas como B se adecuan para aplicaciones con menores requerimientos técnicos. En contraste, los materiales sin clasificar reflejan mayor heterogeneidad y menor calidad, lo que

refuerza la necesidad de un sistema de gestión eficiente para maximizar el valor del material reciclado.

### 3.2.1.3.3 Resultados de densidad

El análisis de la densidad de los materiales reciclados, comparados con el material virgen, permite evaluar su viabilidad en el proceso productivo y su relación con defectos como ojo de pescado, vibrado, variaciones de espesor y fallos de sellado. Estos problemas están asociados principalmente a la heterogeneidad y la presencia de contaminantes en los materiales reciclados. Se evidencian los resultados de los promedios de densidad en el gráfico de barras descritos en la Figura 3-12 y la variabilidad de los datos obtenidos en el gráfico de Caja y Bigotes de la Figura 3-12.

El material virgen (ADPE Metaloceno) presenta una densidad promedio de  $0,93 \text{ g/cm}^3$  con una mínima variabilidad, lo que asegura un comportamiento uniforme y la ausencia de defectos durante el procesamiento. Este es el estándar ideal en cuanto a consistencia y calidad.

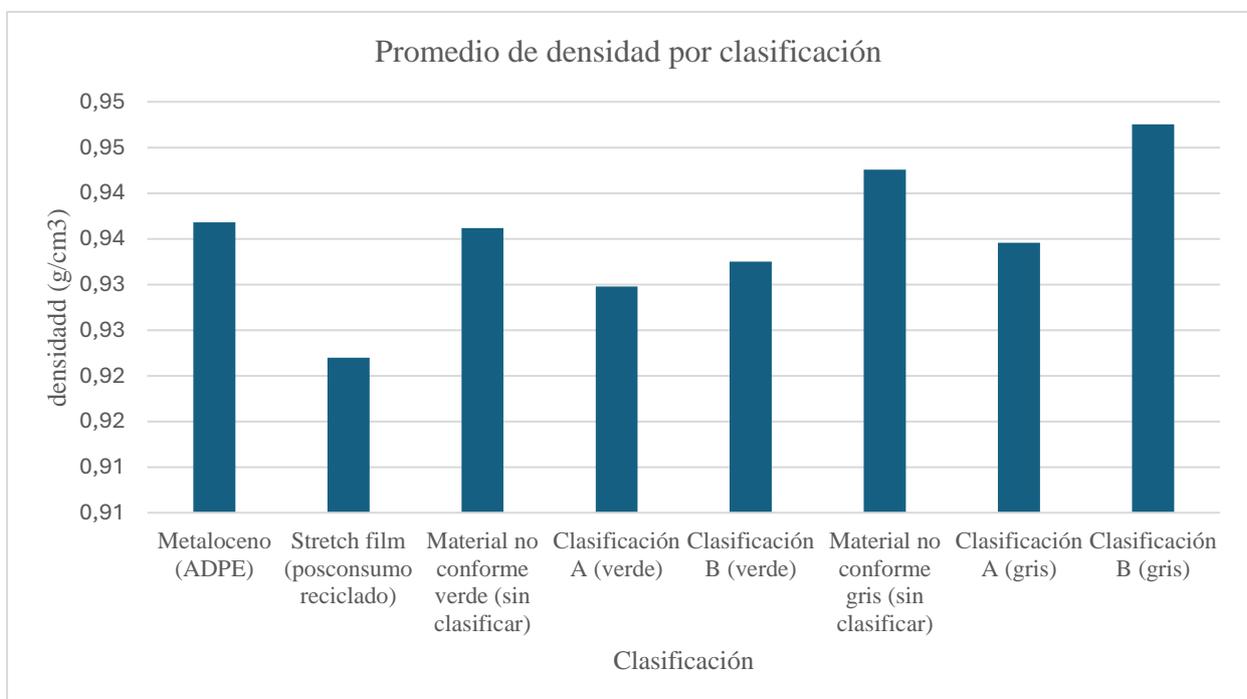
En el caso del material reciclado de posconsumo (Stretch Film), con una densidad promedio de  $0,92 \text{ g/cm}^3$  y mayor variación, su heterogeneidad incrementa la probabilidad de defectos, especialmente el ojo de pescado, causado por contaminantes o incompatibilidad de polímeros, y vibrado, derivado de la inestabilidad en la extrusión.

Los desperdicios sin clasificar, tanto verdes como grises, aunque tienen densidades promedio cercanas al material virgen ( $0,93 \text{ g/cm}^3$ ), muestran mayor dispersión en los valores. Esta irregularidad en su composición aumenta el riesgo de defectos durante el proceso, especialmente en la formación de películas inconsistentes y sellos débiles.

Por su parte, los materiales clasificados ofrecen resultados más favorables. La Clasificación A, tanto verde como gris, presenta una densidad promedio consistente (0,93-0,94 g/cm<sup>3</sup>) y una variabilidad reducida, lo que las hace aptas para recirculación, especialmente en aplicaciones menos exigentes. En cambio, la Clasificación B, aunque similar en promedio, exhibe mayor dispersión, lo que la vuelve más susceptible a defectos como ojo de pescado y fallos de sellado.

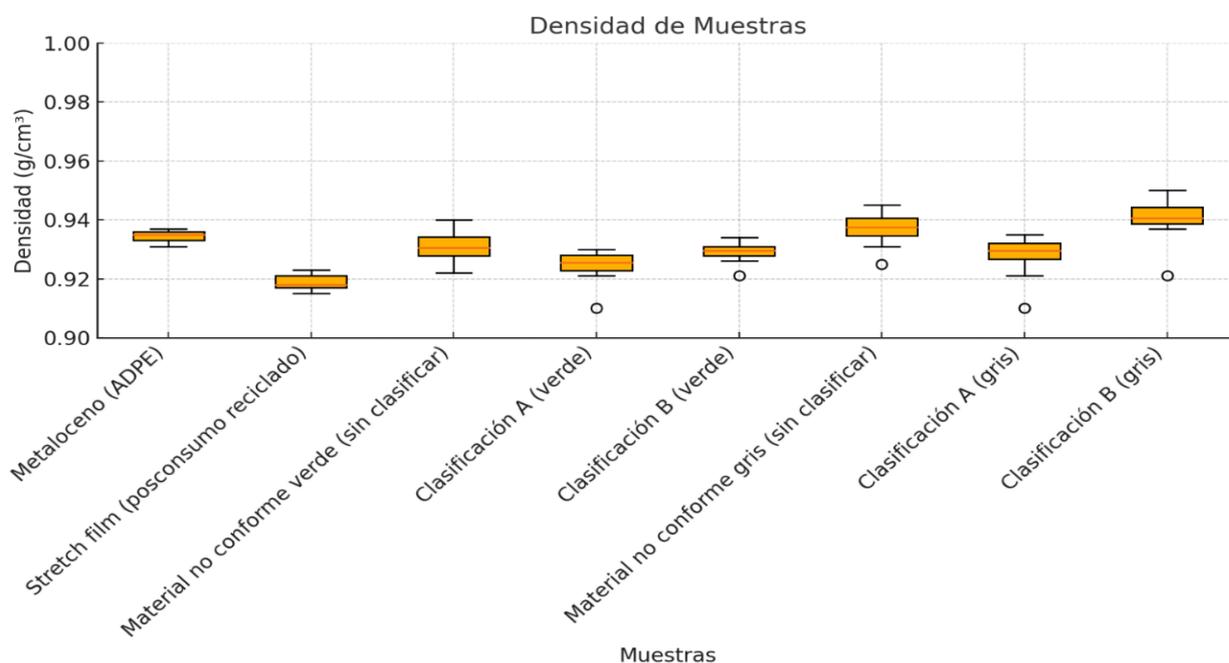
### Figura 3-11

*Gráfico de barras de promedios de densidad por clasificación*



**Figura 3-12**

*Gráfico de Caja y Bigotes de densidad por clasificación*



El análisis ANOVA confirmó diferencias estadísticamente significativas entre las categorías, con un estadístico F de 14,05 y un p-valor de  $1,88 \times 10^{-11}$ . Este resultado valida que el nivel de contaminación y el proceso de clasificación tienen un impacto directo en las propiedades físicas del material reciclado.

En general, los resultados demuestran que el sistema de clasificación contribuye a mejorar la calidad del material reciclado, reduciendo la variabilidad y permitiendo su uso en aplicaciones con mayores requerimientos técnicos

#### 3.2.1.4 Evaluación de calidad

La calidad de los materiales reciclados fue evaluada en función de tres parámetros clave: el Índice de fluidez, la densidad y los resultados de FTIR, comparándolos con un estándar establecido basado en ADPE virgen. Esta comparación permite determinar la viabilidad de

los materiales para su reincorporación en aplicaciones específicas y evidencia la efectividad del sistema de clasificación implementado.

En la Tabla 3-9 se resumen los resultados de la evaluación de calidad para las muestras clasificadas como A, B y sin clasificar, contrastándolos con los estándares del ADPE virgen.

**Tabla 3-9**

*Resumen de parámetros de calidad para evaluación de fundas a reciclar*

<b>Parámetro</b>	<b>Estándar (ADPE)</b>	<b>Clasificación A</b>	<b>Clasificación B</b>	<b>Sin Clasificar</b>	<b>Cumplimiento</b>
Índice de fluidez (g/10 min)	0,95–1,20	1,1–1,20	0,78–0,9	0,60–0,70	A y B cumplen para aplicaciones específicas.
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,940–0,970	0,92–0,93	0,93–0,95	0,917– 0,93	A y B están dentro de rangos aceptables.
FTIR	Sin contaminantes visibles	Alta similitud	Leves trazas de contaminantes	Presencia de carbonilos y OH	Solo A cumple con alta calidad.

Las muestras clasificadas como A presentaron una calidad sobresaliente en todos los parámetros analizados. Los valores de Índice de fluidez estuvieron en el rango óptimo de

1,10–1,20 g/10 min, mientras que la densidad osciló entre 0,926–0,933 g/cm<sup>3</sup>, lo que refleja una composición química y física uniforme. Además, los espectros FTIR mostraron alta similitud con el ADPE virgen, sin señales significativas de contaminantes como carbonilos (1720 cm<sup>-1</sup>) o grupos OH (3400 cm<sup>-1</sup>). Esto las hace ideales para aplicaciones exigentes, como empaques de alta calidad.

Por otro lado, las muestras de Clasificación B presentaron valores aceptables, con un Índice de fluidez entre 0,80–0,91 g/10 min y una densidad de 0,929–0,945 g/cm<sup>3</sup>. Sin embargo, los espectros FTIR revelaron leves trazas de contaminantes, lo que las posiciona como materiales adecuados para aplicaciones secundarias o productos con menores requerimientos técnicos.

Finalmente, los materiales sin clasificar mostraron una calidad inferior en todos los parámetros. El Índice de fluidez fue el más bajo (0,60–0,70 g/10 min), la densidad presentó mayor dispersión (0,917–0,935 g/cm<sup>3</sup>) y los espectros FTIR evidenciaron señales de carbonilos y grupos OH, indicando degradación y contaminación significativa. Esto refuerza la importancia del sistema de clasificación para optimizar la calidad del material reciclado y maximizar su valor en aplicaciones industriales.

#### 3.2.1.5 Disposición de materiales reciclados

El destino final de los materiales se definió en función de los resultados del control de calidad. El objetivo de este apartado es la optimización del uso de los materiales aceptados y determinar las acciones necesarias para los materiales que requieren reproceso y gestionar de forma responsable los materiales rechazados.

Los materiales clasificados como A fueron destinados a reincorporación directa en procesos de producción, dado que cumplieron con los estándares establecidos en términos de Índice de fluidez, densidad y composición química (evaluada mediante FTIR). Este grupo es adecuado para aplicaciones de alta exigencia, como la fabricación de empaques plásticos de alta calidad.

Los materiales clasificados como B, aunque no alcanzaron la calidad de la clasificación A, presentaron características aceptables para su reutilización en aplicaciones secundarias. Estos materiales fueron destinados a reincorporación en productos de menor exigencia técnica, como bolsas plásticas para usos generales, garantizando así su aprovechamiento económico.

Por último, los materiales sin clasificar, debido a su heterogeneidad y alta presencia de contaminantes, no fueron aptos para reciclaje mecánico directo. En estos casos, se consideraron las alternativas establecidas en el Acuerdo Ministerial 19, incluyendo su envío a procesos de reciclaje químico o su disposición final en instalaciones adecuadas, asegurando un manejo ambientalmente responsable.

#### 3.2.1.6 Trazabilidad

La trazabilidad fue un elemento esencial del sistema de gestión, ya que permitió realizar un seguimiento preciso de los materiales reciclados desde su generación hasta su destino final. Esto se logró mediante un sistema estructurado que combinó etiquetado único, y un registro centralizado. Cada lote fue identificado con un código único que incluyó información sobre el tipo de material, su origen, color, categoría y los resultados de las pruebas de calidad realizadas.

Toda esta información se documentó en un registro centralizado, descrito en la Figura 3-14, donde se monitoreó las decisiones sobre su destino y cualquier manipulación o almacenamiento realizado.

**Figura 3-13**

*Cuadro resumen de parámetros para la trazabilidad*

<b>PRODUCTO:</b>	<input type="text"/>	
<b>PROCESO</b>	<b>Extrusión</b>	<input type="checkbox"/>
	<b>Impresión</b>	<input type="checkbox"/>
	<b>Sellado</b>	<input type="checkbox"/>
<b>COLOR</b>	<b>Verde</b>	<input type="checkbox"/>
	<b>Gris</b>	<input type="checkbox"/>
	<b>Blanco</b>	<input type="checkbox"/>
	<b>Gris</b>	<input type="checkbox"/>
<b>CATEGORÍA</b>	<b>A</b>	<input type="checkbox"/>
	<b>B</b>	<input type="checkbox"/>
	<b>C</b>	<input type="checkbox"/>
<b>IDENTIFICACIÓN</b>	<b>Índice de fluidez</b>	<input type="checkbox"/>
	<b>Densidad</b>	<input type="checkbox"/>
	<b>FTIR</b>	<input type="checkbox"/>
<b>DISPOSICIÓN FINAL</b>	<b>Reincorporación directa</b>	<input type="checkbox"/>
	<b>Reincorporación indirecta</b>	<input type="checkbox"/>
	<b>Reciclaje externo</b>	<input type="checkbox"/>

A partir de estos registros, se elaboraron reportes periódicos que proporcionaron datos sobre el flujo de materiales, volúmenes procesados y rechazados, y la efectividad del sistema de gestión. Estos reportes fueron fundamentales para medir indicadores clave, como la reducción de desperdicios.

### **3.3 Indicadores**

#### **3.3.1 Resultados de las pruebas mecánicas**

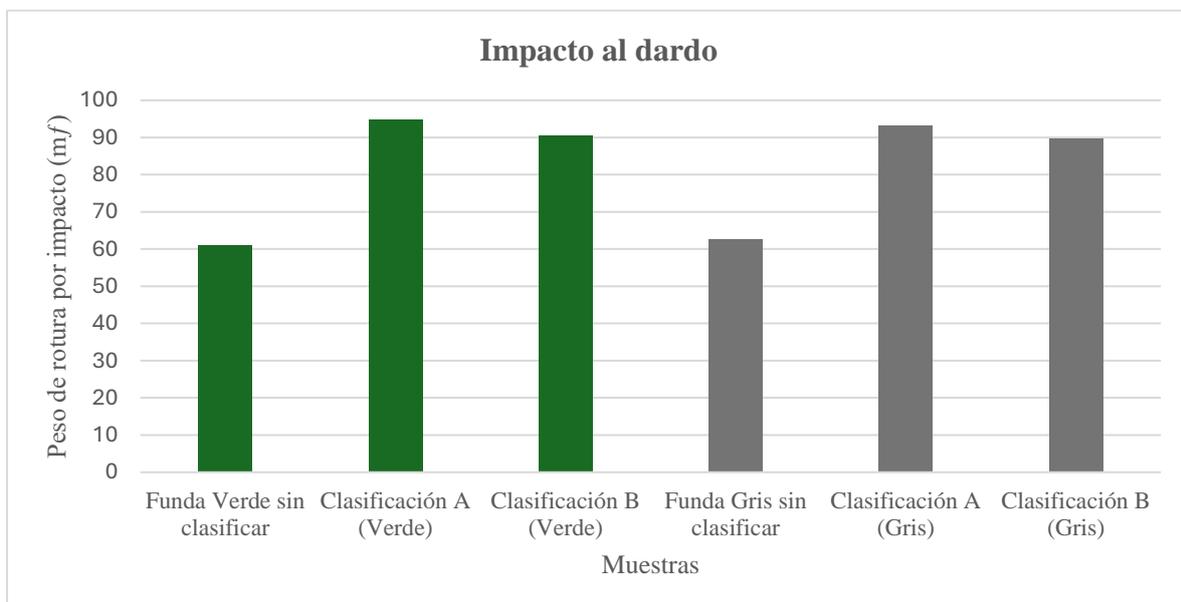
##### **3.3.1.1 Impacto al dardo**

El análisis de los resultados del ensayo de impacto al dardo, realizado según la norma ASTM D1709, demostró diferencias significativas en la resistencia de los materiales reciclados según su clasificación, como se observa en la Figura 3-15. Las fundas clasificadas como A,

tanto verdes como grises, presentaron los valores más altos de resistencia al impacto, con un rango cercano al ADPE virgen, lo que evidencia su composición homogénea y su bajo nivel de defectos críticos. Por otro lado, las fundas de clasificación B mostraron una resistencia intermedia, aceptable para aplicaciones menos exigentes, pero con una ligera variabilidad atribuida a la presencia de contaminantes menores. Finalmente, las fundas sin clasificar reflejaron una resistencia considerablemente menor y una mayor dispersión en los datos, indicando una heterogeneidad significativa y defectos estructurales importantes.

**Figura 3-14**

*Gráfico de barras de ensayo de impacto al dardo de fundas verdes y grises*



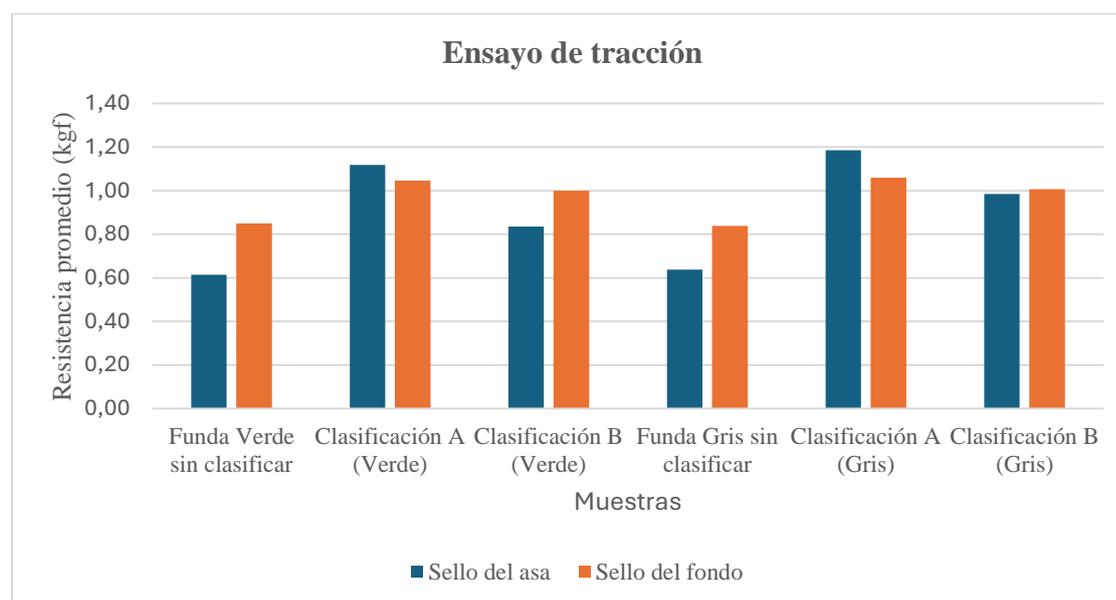
### 3.3.1.2 Resistencia a la tracción

En el ensayo de resistencia a la tracción, llevado a cabo conforme a la norma ASTM F88, se evaluaron las áreas selladas, específicamente el sello del asa y el sello del fondo, para cada clasificación de material. Los resultados descritos en la Figura 3-16 mostraron que las fundas clasificadas como A destacaron por su consistencia y altos valores de resistencia, alcanzando resultados similares a los de las fundas fabricadas con ADPE virgen, lo que reafirma su calidad superior. Las fundas de clasificación B también demostraron valores aceptables, pero

con mayor variabilidad y algunas fallas tempranas debido a contaminantes menores. Por el contrario, las fundas sin clasificar presentaron los valores más bajos de resistencia a la tracción, con alta dispersión entre las mediciones, lo que refleja su falta de homogeneidad y la presencia de defectos.

**Figura 3-15**

*Gráfico de barras de resistencia promedio del ensayo de tracción a los sellos de las fundas verde y gris*



### 3.3.2 Reducción de desperdicio

Los resultados presentados en las Tabla 3-10 para el tipo de funda verde y en la Tabla 3-11 para el tipo de funda gris reflejan una mejora significativa en la reducción del desperdicio tras la implementación del sistema de clasificación. Estos datos destacan la efectividad del proceso de clasificación para optimizar la eficiencia del reciclaje y minimizar el material desechado.

Para el tipo de funda verde, el proceso sin clasificación generó un desperdicio del 40,88%, lo que equivale a 1937,65 kg de material desechado. Al aplicar la clasificación, las fundas de Clasificación A redujeron el porcentaje de desperdicio a 27,00%, lo que representa una

mejora del 33,95% en comparación con el proceso sin clasificar. Por su parte, las fundas de Clasificación B lograron un porcentaje de desperdicio del 31,00%, alcanzando una reducción del 24,17% en comparación con el proceso sin clasificar.

**Tabla 3-10**

*Porcentajes de reducción de desperdicios en fundas tipo verde clasificadas*

<b>Proceso</b>	<b>Producción (kg)</b>	<b>Desperdicio (kg)</b>	<b>Desperdicio (%)</b>	<b>Reducción de desperdicio (%)</b>
<b>Sin clasificación</b>	4740	1937,65	40,88	-
<b>Usando clasificación A</b>	100	27	27,00	33,95
<b>Usando clasificación B</b>	100	31	31,00	24,17

En el caso de las fundas tipo gris, el proceso sin clasificación generó un desperdicio del 53,96%, correspondiente a 1877,7 kg. Con la clasificación, las fundas de Clasificación A lograron un porcentaje de desperdicio del 35,00%, con una mejora del 35,13% respecto al proceso sin clasificación. Las fundas de Clasificación B, por otro lado, alcanzaron un porcentaje de desperdicio del 42,00%, logrando una reducción del 22,16%.

**Tabla 3-11**

*Porcentajes de reducción de desperdicios en fundas tipo gris clasificadas*

<b>Proceso</b>	<b>Producción (kg)</b>	<b>Desperdicio (kg)</b>	<b>Desperdicio (%)</b>	<b>Reducción de desperdicio (%)</b>
<b>Sin clasificación</b>	3480	1877,7	53,96	-

<b>Usando clasificación A</b>	100	35	35,00	35,13
<b>Usando clasificación B</b>	100	42	42,00	22,16

---

### 3.4 Económico

El análisis económico realizado para implementar un sistema de clasificación y análisis de materiales reciclados en la producción de fundas plásticas ha demostrado que la propuesta es financieramente viable bajo ciertos escenarios, como se observa resumido en la Tabla 3-12. Actualmente, el proceso presenta un scrap promedio del 23,63%, lo que implica que, por cada 1,000 kg de producción, aproximadamente 236 kg de material son desperdiciados. Este desperdicio se traduce en un costo significativo y afecta directamente la rentabilidad de la empresa. Además, los retrabajos y paradas de máquina representan un 10% del tiempo total de operación, lo que genera ineficiencias y costos adicionales.

Con la implementación del sistema propuesto, que incluye un equipo FTIR y ajustes en el proceso productivo, se ha proyectado una reducción del scrap en un 40%, disminuyendo este porcentaje al 14,18%. En términos prácticos, esta mejora implica que, por cada 1,000 kg de material procesado, se dejarán de desperdiciar aproximadamente 94,5 kg, lo que equivale a una recuperación del 9,45% del material actualmente desperdiciado. Asimismo, los retrabajos y las paradas de máquina se reducirán en un 60%, pasando de un 10% a un 4% del tiempo total, lo que incrementará la disponibilidad operativa de la planta y mejorará la productividad efectiva en un 70%. Esto significa que, en lugar de producir 1,000 kg útiles por ciclo, se alcanzarán hasta 1,700 kg efectivos.

En términos financieros, el análisis detallado muestra que, para una inversión mínima de \$15,800, se obtiene un Valor Actual Neto (VAN) positivo de \$6,041.98 USD, con una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 31%. Estos valores indican que el proyecto no solo es rentable, sino que genera un retorno significativo en comparación con la tasa de descuento utilizada (10%). El Período de Recuperación de la Inversión (PRI) en este escenario es de 15 meses, lo que reafirma su viabilidad en un horizonte de corto plazo.

Sin embargo, para una inversión máxima de \$25,800, el VAN resulta negativo, con un valor de -\$3,958.02 USD, y la TIR es no rentable. Esto refleja que, en este escenario, los flujos de efectivo proyectados no son suficientes para recuperar la inversión inicial en los 2 años analizados. Por lo tanto, es crucial optimizar los costos de implementación o extender el horizonte de análisis para justificar esta inversión.

En términos operativos, la reducción del scrap y los retrabajos permitirá disminuir los costos totales por tonelada procesada en un rango estimado del 10% al 15%, dependiendo de la línea de producción. Además, el aumento de la productividad fortalecerá la capacidad operativa, permitiendo aprovechar mejor los recursos disponibles. Este proyecto también garantiza el cumplimiento de la Ley de Plásticos de un Solo Uso en Ecuador, posicionando a la empresa como un referente en sostenibilidad y economía circular.

**Tabla 3-12***Resultados de análisis económico*

<b>Concepto</b>	<b>Valor actual (%)</b>	<b>Proyección (%)</b>	<b>Impacto (%)</b>
Scrap promedio	23.63	14.18	-40.00
Material desperdiciado (por 1000kg)	236.3 kg	141.8 kg	-94.5 kg
Tiempo de retrabajos y paradas	10	4	-60.00
Producción efectiva	100	170	+70
Reducción de costos totales (estimdo)	--	--	10 a 15
Retorno de la inversión (ROI)	--	31	--
VAN (Inversión mínima)	--	6041.98 USD	--
VAN (Inversión máxima)	--	-3958.02 USD	--
TIR (Inversión mínima)	--	31	--
TIR (Inversión máxima)	--	No rentable	--
Período de recuperación de la inversión (PRI)	--	15 a 25 meses	--

## Capítulo 4

## 4. Capítulo 4

### 4.1 Conclusiones

- El sistema de gestión de plásticos reciclados, basado en la clasificación según características fisicoquímicas, permitió mejorar significativamente la calidad del producto final. Esto se evidenció a través de la evaluación de parámetros clave como el Índice de fluidez, la densidad y los espectros FTIR, que mostraron alta similitud con el estándar de ADPE virgen en las fundas clasificadas como A. Este resultado valida la efectividad del sistema para cumplir con los objetivos de mejora en las propiedades de los materiales reciclados.
- La clasificación inicial basada en características físicas y químicas fue fundamental para reducir la heterogeneidad de los materiales reciclados y garantizar una mayor consistencia en el producto final. Las fundas clasificadas como A presentaron las mejores propiedades mecánicas, como mayor resistencia al impacto y tracción, mientras que las de clasificación B alcanzaron niveles aceptables para aplicaciones secundarias. Los materiales sin clasificar, en cambio, mostraron un desempeño significativamente inferior, reforzando la importancia de la clasificación como parte del sistema de gestión.
- La implementación del sistema de gestión permitió una reducción considerable en el porcentaje de desperdicio generado durante la producción de fundas plásticas. Las fundas clasificadas como A redujeron el desperdicio hasta en un 35,13% en comparación con el proceso sin clasificación, mientras que las de clasificación B lograron una reducción del 24,17%. Esto demuestra que el sistema de gestión no solo mejora la calidad del material reciclado, sino que también contribuye a la sostenibilidad del proceso al minimizar los residuos generados.

- El análisis económico evidenció que la implementación del sistema de gestión genera un impacto positivo al reducir los costos asociados al desperdicio de materiales y mejorar la eficiencia del proceso productivo. La optimización del uso de materiales reciclados clasificados incrementa la viabilidad económica de su incorporación en la producción de fundas plásticas, proporcionando una solución sostenible tanto desde el punto de vista ambiental como financiero. Esto valida la importancia de integrar un enfoque de gestión estructurado en la industria del reciclaje plástico.

## 4.2 Recomendaciones

- Es fundamental que quienes deseen reabrir el proyecto o implementar el sistema en otra empresa evalúen la infraestructura tecnológica y operativa disponible. Se debe garantizar que existan equipos adecuados para realizar análisis como FTIR, densidad e índice de fluidez (MFI), ya que son esenciales para asegurar la calidad del material reciclado. En caso de limitaciones económicas o tecnológicas, es recomendable establecer alianzas estratégicas con laboratorios externos que puedan proporcionar estos servicios, lo que reduce la inversión inicial sin comprometer los estándares de calidad.
- Se sugiere adaptar el sistema de gestión a las capacidades específicas de la empresa. Esto implica diseñar un proceso de clasificación y trazabilidad que sea viable para las condiciones operativas existentes. Por ejemplo, en empresas con recursos limitados, es posible implementar un sistema más básico que combine procesos manuales para la identificación y etiquetado de materiales con herramientas digitales accesibles, como hojas de cálculo. Realizar pruebas piloto a pequeña escala puede ser una estrategia

efectiva para comprobar la viabilidad del sistema antes de una implementación completa.

- Finalmente, se recomienda capacitar al personal involucrado en el sistema de gestión, asegurándose de que comprendan tanto la importancia del reciclaje como los procedimientos técnicos necesarios para su operación, como la clasificación visual y las pruebas de calidad. Además, es crucial fomentar una cultura organizacional orientada a la sostenibilidad, donde se valore el reciclaje como un pilar estratégico para mejorar la competitividad y cumplir con las normativas ambientales. Esto asegurará un compromiso colectivo que facilite la implementación exitosa del sistema.

### 4.3 Bibliografía

AlMa'adeed, Mariam. (2015). Processing and characterization of polyethylene-based composites. 10.1179/2055035915Y.0000000002.

Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625-2643.

Asamblea Nacional del Ecuador (2022). Ley orgánica para la racionalización, reutilización y reducción de plásticos de un solo uso, p. 15. Recuperado de <https://www.registro.gob.ec/legislacion/17659-2020-04-10-0071>

Boz, E. (2022). Material recycling of post-consumer flexible polyethylene packaging waste. Department of Industrial and Materials Science. Chalmers University of Technology

Butt, Faizan & Shangguan, Donghui & Butt, Asim Qayyum & Arshad, Muhammad & Raja, Babar & Khitab, Anwar & Ding, Yongjian & Li, Da & Mukhtar, Muhammad. (2023). An Experimental Study to Mitigate Environmental Impacts by Transforming Waste Plastic Bags into Paving Blocks and Roof Tiles. *Sustainability*. 15. 10.3390/su152215801.

Cámara de Comercio de Guayaquil. (2021). Informe sobre la situación del manejo de residuos plásticos en Ecuador. Recuperado de [http://www.camaraguayaquil.com/wp-content/uploads/2021/07/Informe\\_Manejo\\_Residuos\\_Plasticos\\_Ecuador.pdf](http://www.camaraguayaquil.com/wp-content/uploads/2021/07/Informe_Manejo_Residuos_Plasticos_Ecuador.pdf)

Carvajal Quezada, I. (2016). Caracterización de mezclas de polietileno virgen con reciclado.

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142062>

Carl Pirkle, J., & Braatz, R. D. (2003). Dynamic modeling of blown-film extrusion. *Polymer Engineering & Science*, 43(2), 398-418. <https://doi.org/10.1002/pen.10033>

da Silva, Daniel & Wiebeck, Hélio. (2022). ATR-FTIR Spectroscopy Combined with Chemometric Methods for the Classification of Polyethylene Residues Containing Different Contaminants. *Journal of Polymers and the Environment*. 30. [10.1007/s10924-022-02396-3](https://doi.org/10.1007/s10924-022-02396-3).

Demets, Ruben, van Kets, Karen, Huysveld, Sophie, Dewulf, Jo, Meester, Steven de, Ragaert, Kim, (2021). Addressing the complex challenge of understanding and quantifying substitutability for recycled plastics. *Resour. Conserv. Recycl.* 174,105826 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105826>.

Golkaram, M., Mehta, R., Taveau, M., Schwarz, A., Gankema, H., Urbanus, J.H., van Harmelen, T. (2022). Quality model for recycled plastics (QMRP): an indicator for holistic and consistent quality assessment of recycled plastics using product functionality and material properties. *J. Clean. Prod.*, 132311.

Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126.

Kerps, Anna & Velarde, Pamela & Marbach, Lena & Mörbitz, Philip. (2022). Measuring the circularity potential of recycled LDPE based on quantity and quality conservation - A functional requirement matrix approach. *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 17. 200127. 10.1016/j.rcradv.2022.200127.

Plastivida. (2023). Nuevas prácticas industriales en la producción de plásticos reciclados en Ecuador. Recuperado de <https://plastivida.com.ec/>

Prado-Cabezas, M., (2024) Impacto ambiental de las bolsas de plástico: un análisis del ciclo de vida en el cantón San Lorenzo. *Reincisol*, 3(6), pp. 3039-3060.  
[https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(6\)3039-3060](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)3039-3060)

Rigamonti, L., Grosso, M., Giugliano, M. (2010). Life cycle assessment of sub-units composing a MSW management system. *J. Clean. Prod.* 18, 1652–1662.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.029>.

Rojas, T. (2023). Todo sobre el polietileno de alta densidad (HDPE): Usos, ventajas y mercado actual. *Tecnología del Plástico*. <https://www.plastico.com/es/noticias/todo-sobre-el-polietileno-de-alta-densidad-hdpe-usos-ventajas-y-mercado-actual>

Vilaplana, F. and Karlsson, S. (2008). Quality Concepts for the Improved Use of Recycled Polymeric Materials: A Review. *Macromol. Mater. Eng.*, 293: 274-297.  
<https://doi.org/10.1002/mame.200700393>

WWF Ecuador. (2021). Iniciativas para reducir la contaminación por plásticos en Ecuador.

Recuperado de <https://www.wwf.org.ec/noticias/?u=Ecuador-lidera-una-historica->

[hoja-de-ruta-para-reducir-la-contaminacion-por-plasticos](https://www.wwf.org.ec/noticias/?u=Ecuador-lidera-una-historica-hoja-de-ruta-para-reducir-la-contaminacion-por-plasticos)