

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

“FORMULACIÓN DE UNA MEZCLA DE PEAD RECICLADO Y VIRGEN  
PARA LA ELABORACIÓN DE ENVASES DE PRODUCTOS QUÍMICOS  
PARA LIMPIEZA”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

María José Rojas Nieto

Ana Paulina Yépez Del Pozo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

## DEDICATORIA

El presente proyecto está dedicado a la memoria de mi tía Rosario Grace Del Pozo Cazar, quien me crio y me amó más de lo que merecía. Durante muchos años fuiste mi pilar y ahora, eres la luz que guía mi camino, quien me consuela cuando dudo de mí misma, quien me arrulla con su amor infinito.

Sigues estando presente en cada paso que doy y ten por seguro que te enorgullecerás de mí.

“El valor de las cosas no está en el tiempo que duran sino en la intensidad con la que las vives. Por eso hay momentos inolvidables, cosas inexplicables y personas incomparables”.

Te amo Chacha.

***Ana Paulina Yépez Del Pozo***

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico principalmente a Dios, quien me dio la vida y me acompaña en cada paso que doy.

A mis padres, por su amor y apoyo incondicional.

A todas las personas que durante estos años de carrera universitaria estuvieron presentes, escuchando y aconsejando en las buenas y en las malas. Por darme ánimos, soportar mis momentos de drama y confiar siempre en mí.

***María José Rojas Nieto***

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por su constante amor que nos brindó fuerza y consuelo. Él nos dio certeza donde el mundo puso incertidumbre. A nuestros padres, Ana María Del Pozo Cazar, Cesar Eduardo Yépez Flores, Nury Nieto Barquet y Gabriel Rojas Navas por darnos la oportunidad de estudiar y crecer, por orar día y noche por sus hijas y ser incondicionales aún en los peores momentos.

A nuestros tutores, MSc. Jenny María Venegas Gallo y al PhD. Andrés Francisco Rigail Cedeño, por brindarnos la oportunidad de trabajar en este proyecto y saber guiarnos en cada paso dado. Su apoyo fue invaluable.

Finalmente, a todos aquellos que cruzaron nuestros caminos durante estos 6 años de carrera, gracias por esos momentos llenos de alegría y esas enseñanzas que hicieron de nosotras las mujeres orgullosas que somos ahora.

Gracias por ser parte de esta sinfonía que seguirá resonando cada vez más alto.

***María José Rojas Nieto***  
***Ana Paulina Yépez Del Pozo***

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *María José Rojas Nieto y Ana Paulina Yépez Del Pozo* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”




María José Rojas Nieto




Ana Paulina Yépez Del  
Pozo

## EVALUADORES

  
Nadia Magaly Flores Manrique, MSc.  
PROFESOR DE LA MATERIA

  
Jenny María Venegas Gallo, MSc.  
PROFESOR TUTOR

  
Andrés Francisco Rigail Cedeño. PhD.  
PROFESOR COTUTOR

## RESUMEN

La acumulación de desechos plásticos y el mal manejo de estos ha hecho que el Ecuador busque nuevas estrategias para gestionar los residuos, una de las principales es el reciclaje.

El presente proyecto tiene como principal propósito aprovechar este material mediante la formulación de una mezcla para la elaboración de recipientes para envasar químicos de limpieza a partir de Polietileno de Alta densidad (PEAD) reciclado y virgen.

Se propuso evaluar el material reciclado a utilizar mediante el análisis de índice de fluidez. Obtenido los resultados, se realizaron cinco combinaciones entre la materia reciclada y virgen usando una extrusora de doble tornillo, las cuales fueron pelletizadas y llevadas a un proceso de moldeo con la ayuda de una prensa térmica para elaborar las probetas a analizar. Estas fueron estudiadas mediante los ensayos de Índice de Fluidez, Resistencia a la Tracción, Resistencia al Impacto, Viscosidad, Infrarrojo (FTRI) y Difracción por Rayos X (XRD).

Los resultados determinaron las propiedades físico-mecánicas y reológicas de cada una de las mezclas. Se observó que existe un bajo grado de degradación con un máximo del 2.6 % en la mezcla del 100% reciclado, a partir de los espectrogramas obtenidos por FTRI. La resistencia a la tracción e impacto se ven levemente afectadas, con rangos entre 27.57 - 28.64 MPa y 135 - 197 J/m respectivamente, cumpliendo con las características propias de un proceso de soplado.

En base a estos resultados se concluye que las mezclas son aptas para su reprocesamiento industrial.

**Palabras Clave:** polietileno de alta densidad, reciclado, virgen, probetas, ensayos.

## ***ABSTRACT***

The accumulation of plastic waste and the mishandling of these has made Ecuador look for new strategies to manage waste, one of the main ones is recycling.

The main purpose of this project is to take advantage of this material by formulating a mixture for the preparation of containers for packaging cleaning chemicals from recycled and virgin High-Density Polyethylene (HDPE).

It was proposed to evaluate the recycled material to be used through the melt flow index (MFI) analysis. Once the results were obtained, five combinations were made between the recycled and virgin matter using a double screw extruder, which were pelletized and taken to a molding process with the help of a thermal press to prepare the test specimens to be analyzed. These were studied using the MFI, Tensile Strength, Impact Resistance, Viscosity, Infrared (FTIR) and X-Ray Diffraction (XRD) tests.

The results determined the physicomechanical and rheological properties of each of the mixtures. It was observed a low degree of degradation with a maximum of 2.6% in the 100% recycled mixture, from the spectrograms obtained by FTIR. Tensile and impact resistance are slightly affected, with ranges between 27.57 - 28.64 MPa and 135 - 197 J/m respectively, complying with the characteristics of a blowing process.

Based on these results, it is concluded that the mixtures are suitable for its industrial reprocessing.

**Keywords:** high density polyethylene, recycled, virgin, specimens, tests.



# ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	VI
RESUMEN.....	VII
<i>ABSTRACT</i> .....	VIII
ÍNDICE GENERAL.....	IX
ABREVIATURAS .....	XII
SIMBOLOGÍA .....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVI
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema .....	1
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General .....	4
1.3.2 Objetivos Específicos .....	4
1.4 Marco teórico .....	5
1.4.1 Polietileno.....	5
1.4.1.1 Termoplásticos .....	6
1.4.1.2 Estructura física del Polietileno.....	7
1.4.1.3 Polietileno de alta densidad .....	8
1.4.1.4 Aplicaciones y reciclaje de PEAD .....	9
CAPÍTULO 2.....	12
2. Metodología .....	12
2.1 Evaluación de la Materia Prima .....	14
2.2 Preparación de Muestras.....	15
2.3 Pruebas de Índice de Fluidez .....	18

2.4	Extrusora de doble tornillo .....	20
2.5	Elaboración de las probetas y Ensayos.....	23
2.6	Caracterización de las mezclas .....	24
2.6.1	Resistencia al Impacto Izod .....	24
2.6.2	Resistencia a la Tracción o Tensión.....	24
2.6.3	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) .....	26
2.6.4	Reología.....	27
2.6.5	Dispersión por rayos X.....	28
CAPÍTULO 3.....		30
3.	Resultados y análisis.....	30
3.1	Resultados Prueba de Índice de Fluidez .....	30
3.2	Resistencia al Impacto IZOD ASTM D256.....	33
3.3	Resultados Resistencia a la Tracción .....	34
3.4	Resultados FTIR.....	35
3.5	Análisis XRD.....	37
CAPÍTULO 4.....		42
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	42
	Conclusiones .....	42
	Recomendaciones.....	43
BIBLIOGRAFÍA.....		45
APÉNDICES .....		47
	Apéndice A .....	48
	Espectrogramas obtenidos en el ensayo FTIR .....	48
	Apéndice B .....	54
	Difractogramas obtenidos del análisis por difracción de Rayos X .....	54
	Apéndice C .....	60

Catálogo resinas PEAD ..... 60

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
MAE	Ministerio de Ambiente
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
MFI	Índice de Fluidez (Siglas del inglés: Melt Flow Index)
XRD	Difracción por Rayos X (Siglas del inglés: X-Ray Diffraction)
FTRI	Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier (Siglas del inglés: Fourier-Transform infrared spectroscopy)
PEAD	Polietileno de Alta Densidad
PEBD	Polietileno de Baja Densidad
PEMD	Polietileno de Mediana Densidad
PE	Polietileno
PET	Polietileno tereftalato
PVC	Cloruro de polivinilo
PP	Polipropileno
ASEPLAS	Asociación Ecuatoriana de Plásticos
LEMAT	Laboratorio de Ensayos a Materiales
FMCP	Facultad de Mecánica y Ciencias de la Producción
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censo

## SIMBOLOGÍA

MMT	Millones de Toneladas Métricas
Kg	Kilogramo
mg	Miligramo
m	Metro
Pa	Pascal
MPa	Mega Pascal
J	Jules
s	Segundos
°C	Grados Celsius
mm	Milímetro
L	Litro
%	Porcentaje
cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos
h	Horas

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de Metodología.....	13
Figura 2.2 Pelletización de la Materia Prima.....	14
Figura 2.3 Lavado de la materia prima .....	16
Figura 2.4 Impurezas en el fondo de las bandejas .....	16
Figura 2.5 Contaminación por mezcla de material.....	17
Figura 2.6 Plastómero del Laboratorio de ASEPLAS.....	19
Figura 2.7 Limpieza del Plastómero.....	19
Figura 2.8 Extrusora de doble Tornillo, Brabender .....	20
Figura 2.9 Material extraído de la extrusora .....	21
Figura 2.10 Proceso de cortado para la mezcla obtenida.....	22
Figura 2.11 Mezcla pelletizada .....	22
Figura 2.12 Prensa Hidráulica del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos.....	23
Figura 2.13 Molde para probetas de Impacto Izod.....	24
Figura 2.14 Gráfica de Tensión vs Elongación .....	25
Figura 2.15 Probetas para ensayo de Tracción .....	25
Figura 2.16 Diagrama de funcionamiento de un espectrómetro infrarrojo .....	26
Figura 2.17 Moldes para probetas de Viscosidad .....	28
Figura 2.18 Esquema de Difracción por Rayos X .....	29
Figura 3.1 Índice de Fluidez de cada una de las mezclas realizadas .....	32
Figura 3.2 Resistencia al impacto IZOD en comparación con % de PEAD reciclado	33
Figura 3.3 Esfuerzo Máximo (MPa) aplicado a cada mezcla .....	34
Figura 3.4 Comparación entre el Módulo de Young y el Esfuerzo Máximo .....	35
Figura 3.5 Espectrograma FTIR de las mezclas.....	36
Figura 3.6 Difractograma de la muestra Virgen .....	37
Figura 3.7 Difractograma Mezcla 100% Reciclado .....	38
Figura 3.8 Overlay de Difractogramas .....	38
Figura 3.9 Diagrama logarítmico de Viscosidad respecto a la velocidad de corte .....	40
Apéndice A.1 Espectrograma de la mezcla del 100% .....	49
Apéndice A.2 Espectrograma de la mezcla 80-20 %.....	50
Apéndice A.3 Espectrograma de la mezcla 70-30 %.....	51
Apéndice A.4 Espectrograma obtenido de la mezcla 50-50 .....	52

Apéndice A 5. Espectrograma Obtenido por la muestra Virgen.....	53
Apéndice B.1 Difractograma de la mezcla 100% .....	55
Apéndice B.2 Difractograma de la mezcla 80-20%.....	56
Apéndice B.3 Difractograma de la mezcla 70-30%.....	57
Apéndice B.4 Difractograma de la mezcla 50-50 .....	58
Apéndice B.5 Difractograma de la muestra Virgen .....	59
Apéndice C.1 Productos y propiedades de PEAD para soplado.....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Influencia de la Ramificación. ....	8
Tabla 1.2 Relación entre el Peso Molecular y las Propiedades de los polímeros .....	9
Tabla 2.1 Porcentajes de mezclas a realizar .....	12
Tabla 2.2 Proporciones de Envases desechados en la ciudad.....	15
Tabla 2.3 Porcentaje de Impureza de las muestras.....	17
Tabla 2.4 Procesos según el Índice de Fluidéz determinado.....	18
Tabla 2.5 Rangos de onda de acuerdo con las vibraciones en los espectros. ....	27
Tabla 3.1 Resultados de MFI ASTM D1238 a muestras.....	30
Tabla 3.2 Ensayo MFI según Norma ASTM D1238 a PEAD reciclado y virgen.....	31
Tabla 3.3 Resultados de MFI ASTM D1238 a mezclas. ....	31
Tabla 3.4 Resultados de Resistencia al Impacto IZOD ASTM D256 .....	33
Tabla 3.5 Resultados de Resistencia a la Tracción ASTM D638.....	34



# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

La producción de materiales sintéticos a gran escala comenzó en los albores de 1950 y hasta el año 2015 la manufactura oscilaba en 8.300 millones de toneladas métricas (MTM). Se descubrió que 6.300 MTM ya se habían convertido en desechos, del cual solo el 9% fue reciclado, el 12% incinerado y el restante 79% quedó acumulado en desagües o en el medio ambiente natural (Science Advances, 2015). Cabe considerar que, el 40% de los plásticos fabricados anualmente se utilizan para envases que se desechan inmediatamente después de su uso (Hataway, 2017).

En Guayaquil, según la vocera de Puerto Limpio, Karla Aguas, se registran alrededor de 4.200 Toneladas diarias de basura, siendo la ciudad que produce la mayor cantidad de desechos en el Ecuador (Extra, 2016). Investigaciones realizadas por la dirección del Medio Ambiente del Ecuador (MAE) informan que aproximadamente son 180 toneladas de plástico las que se desechan diariamente en esta ciudad.

Uno de los plásticos más usados es el Polietileno de Alta Densidad (PEAD), un termoplástico muy resistente, cuyas características lo vuelven una opción atractiva para la elaboración de envases. Debido sus propiedades (densidad y dureza) es que este material se vuelve peligroso para el medio ambiente, específicamente por su tiempo de vida media y el espacio que ocupa en el planeta durante ese tiempo.

### 1.1 Descripción del problema

El calentamiento global, la contaminación, miles de especies que se encuentran en peligro de extinción y los recursos naturales cada vez más escasos, en un mundo donde el crecimiento exponencial: de la industria, el consumismo y la población, son una amenaza preocupante, es necesario impulsar un modelo económico diferente y regenerativo.

Ante esta necesidad nace la idea de la Economía Circular, un modelo cuyo objetivo es reducir tanto el uso de materiales como la producción de desechos, es decir, aprovechar los recursos, mediante la reducción, reutilización y reciclaje, además apoya los Objetivos de Desarrollo sostenible. (INEN, 2019)

El Ecuador se encuentra en la búsqueda de implementar este sistema, mediante la aplicación de la Norma INEN BS:8001 de Economía Circular, asimismo, se propone la aplicación de leyes, que limiten el uso de plásticos en el país para intentar controlar la contaminación ambiental y proteger la biodiversidad. (INEN, 2019)

Con este marco, varias empresas ecuatorianas buscan el modo de incursionar en la industria del reciclado del plástico. La Asociación Ecuatoriana de Plásticos (ASEPLAS) propone la búsqueda de la composición de una mezcla entre material reciclado y virgen de PEAD, que cumpla con los requerimientos del mercado. A fin de evaluar el comportamiento del PEAD reciclado al mezclarse con la resina virgen de este material.

## **1.2 Justificación del problema**

El presente proyecto tiene como principal objetivo proponer una estrategia para la reducción la contaminación ocasionada por la incorrecta disposición final de los plásticos en Guayaquil, una de las ciudades más importantes del Ecuador, ya que es considerada como uno de los ejes comerciales del país. En este sentido, es necesario implementar mejoras en los procesos de manejo de residuos y reciclaje.

En esta investigación interesa trabajar con plástico porque es un elemento no biodegradable que representa el 31.48% de los residuos sólidos del país, en comparación con el 20.86% de papel-cartón y el 12.68% de vidrio, entre otros (INEC, 2014). Además, es un tema que preocupa a la administración pública y para ello se ha instaurado un Impuesto Redimible a las botellas plásticas que

motiva el proceso de reciclaje y disminuye la contaminación ambiental (Ministerio de industrias y productividad, 2011).

A finales del año 2018, se puso en vigencia tanto en Quito como en Guayaquil la ordenanza municipal para disminución de plásticos, con el objetivo de tomar medidas para regular su fabricación, comercio y uso. Esta ley abarca todos los plásticos de un solo uso (Municipalidad de Guayaquil, 2018). En enero del 2019, la Asamblea Nacional presentó un “Proyecto de Ley Orgánica para la racionalización, reutilización y reciclaje de plásticos y para la prohibición de plásticos de un solo uso en el comercio”, para lograr este cambio no solo en las ciudades más grandes del país, sino a nivel nacional. Estas ordenanzas municipales y leyes entorno al uso del plástico muestran la preocupación del Gobierno ecuatoriano por minimizar el impacto -cada vez mayor- en el medioambiente que genera el desecho de los plásticos.

Las “Políticas para la gestión integral de plásticos en el Ecuador”, redactadas el 2014, se manifiesta que la población tiene,

El derecho de vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir. Procurar viabilizar medidas o actividades que demuestren, producción de bioplásticos degradables o compostables, promoción de ciclo cerrado de vida de productos plásticos y la reutilización o reciclaje de materiales plásticos no biodegradables. (MAE, 2014)

Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) el reciclaje de residuos en los hogares ecuatorianos se ha incrementado en los últimos años, en el 2014 la cifra fue del 38.34%; en el 2015 aumentó casi un punto en relación con el año anterior, 39.40% y el 2016 la cifra alcanzó el 41.46% de hogares que implementaron el reciclaje de desechos (El Comercio, 2017). Si bien, se evidencia un crecimiento mínimo en los procesos de separación de residuos, aún no se logra una culturización nacional sobre este tema.

Aunque las instituciones y centros públicos que cuentan con un sistema de reciclado (tachos de basura clasificados), la mayoría de las personas no separa correctamente sus residuos, esto hace que disminuya el porcentaje de material

que puede ser reciclado. Por ello, es importante no solo incentivar la separación de los residuos sino también dar a conocer el beneficio de obtener un producto a base de un material desechado.

Las empresas en el país, como, por ejemplo: Reciplast, Graham Reciclaje, Fibras Nacionales, Ecuaplastic S.A, Recynter, entre otras, están comenzando a incursionar en este nuevo campo, dado los beneficios financieros y ambientales que esta actividad brinda.

Actualmente son pocas las industrias en Ecuador que se dedican al reciclaje de PEAD debido al costo de su proceso, la falta de conocimiento sobre el material y sus escasas en el mercado, en comparación con el Polietileno tereftalato (PET), que es el plástico más usado en las botellas de bebidas.

Por lo dicho, en la presente investigación se busca conocer el comportamiento del PEAD al mezclarse material virgen y reciclado para procesos de soplado, con el propósito de desarrollar productos de calidad, amigables con el medio ambiente y de bajo costo.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Formular una mezcla de Polietileno de alta densidad virgen y reciclado para la elaboración de recipientes de productos químicos para limpieza que cumpla con las características físico-mecánicas del mercado.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Evaluar las propiedades físicas del material reciclado entregado por una empresa recicladora.

2. Elaborar distintas composiciones de mezclas con el Polietileno reciclado y virgen para el estudio de sus propiedades físico-mecánicas.
3. Seleccionar a partir de los resultados de estos estudios la mezcla de mejor calidad para el proceso de soplado.

## **1.4 Marco teórico**

A continuación, se definirá cada uno de los conceptos con los que se trabajará en esta investigación.

### **1.4.1 Polietileno**

El polietileno (PE) es, químicamente hablando, el polímero más simple. Este se obtiene a partir de la polimerización del etileno y es utilizado mayormente para elaboración de envases, cables, películas, etc. El PE es uno de los plásticos más comunes debido a su bajo precio y fácil fabricación.

A partir de este polímero es que pueden sintetizarse hasta 3 de los plásticos más usados en la industria comercial; el Polietileno de baja densidad (PEBD), Polietileno de mediana densidad (PEMD) y el Polietileno de alta densidad (PEAD).

El PEAD resulta de la catálisis del polietileno con alquil aluminio y tetracloruro de titanio y difiere de sus contrapartes (el PEBD y PEMD) en su elevado punto de fusión y densidad. De acuerdo con la Comisión Petroquímica Mexicana (2002) existe más de un catalizador que puede dar lugar a este producto y son:

1. Catalizador Ziegler – Natta
2. Catalizador proceso Phillips
3. Catalizador Metaloceno

Todos estos tienen en común que, trabajan a temperaturas y presiones relativamente bajas y producen un material de bajo nivel de derivación y alta

densidad; esto se debe a la estabilidad que posee el polímero, por lo que su uso es muy frecuente en las industrias.

A continuación, se anotan algunas de las propiedades del polietileno de alta que lo vuelven favorable para la industria:

- Es sólido, incoloro y translúcido
- Excelente resistencia térmica y química
- Ligereza
- Flexible (aún en bajas temperaturas)
- Opacidad
- Alta densidad
- Fácil de reciclar

Entre las propiedades físicas, químicas y mecánicas del PEAD señalamos las siguientes:

**Densidad:** 0.952 - 0.965 g/cm<sup>3</sup>

**Cristalinidad:** 70 - 80 %

**Resistencia mecánica a la compresión:** 18.6 - 24.8 MPa

**Resistencia mecánica a la flexión:** 30.9 - 43.4 MPa

**Resistencia mecánica a la tracción:** 22.1 - 31 MPa

(Universidad de Barcelona, 2009)

#### **1.4.1.1 Termoplásticos**

Los termoplásticos representan del 70% al 80 % del consumo total de los plásticos (Barbosa, 2006). Este es un material polimérico capaz de ser deformable y moldeable mediante la adición de calor. Por lo general suelen ser polímeros de alto peso molecular, lo que le da la capacidad de ser remodelado y remezclado un número determinado de veces, es decir, reciclado.

La capacidad de ser re-moldeable su atractivo principal por ello muchas industrias lo utilizan, no obstante, esta habilidad no garantiza la calidad de sus propiedades físicas, ya que estas se ven afectadas en cada transición y se van degradando paulatinamente.

Dentro de los termoplásticos existen dos tipos de estructuras dependiendo del grado de interacción entre sus cadenas moleculares, a saber: amorfos y cristalinos.

Por una parte, tenemos los termoplásticos amorfos como el polimetilmetacrilato (PMMA), Poliestireno (PS) y Policarbonato (PC). Estos son polímeros cuya estructura molecular está basada en cadenas fuertemente ramificadas y cuyas ramas laterales son sumamente largas, lo cual genera una construcción irregular, esto hace que sean menos resistentes químicamente; es decir, pueden sufrir de agrietamiento por fatiga, sin embargo, poseen una excelente elasticidad y dentro de la industria son utilizados para la elaboración de: cajas de CD (PS), lentes de contacto, prótesis dentales, fibras ópticas (PMMA), sector automotriz (PC), entre otros productos (Newell, 2011).

Por otra parte, tenemos los termoplásticos cristalinos o semicristalinos, son aquellos que poseen una estructura molecular más estable y logran cristalizarse hasta cierto grado. Estos logran ser más resistentes que los termoplásticos amorfos, pero poseen una baja capacidad elástica, entre ellos se encuentran: el polietileno (PE), Polipropileno (PP), Polibutadieno Estireno (PBT) y el PET (Polietileno Tereftalato) (Newell, 2011).

#### **1.4.1.2 Estructura física del Polietileno**

La característica más importante del polietileno es la cristalinidad que presenta el sólido. Un polietileno tiene la capacidad de presentar una estructura parcialmente cristalina o amorfa, dependiendo de la estructura de su cadena y de las ramificaciones que esta posea.

El polietileno de baja densidad fue el primero de esta categoría en desarrollarse (década de los 50) y los catalizadores usados generaban cadenas altamente ramificadas, estas ramificaciones aumentan los espacios vacíos entre las moléculas principales de la cadena produciendo un polímero de baja densidad y poco resistente ante fuerzas externas. Sin embargo, con el pasar de los años, los nuevos catalizadores logran producir cadenas más compactas y casi libres de ramificaciones logrando así un polímero más denso, fuerte, rígido y cristalino. (Reynoso, 2018)

A continuación, se presenta una tabla con las relaciones entre la ramificación de la cadena, la densidad y la cristalinidad.

**Tabla 1.1 Influencia de la Ramificación.**

Ramificación	Densidad a 20 (g/ cm <sup>3</sup> )	Cristalinidad (%)
0	0.99	95
1	0.96	80
2	0.94	72
3	0.92	60
4	0.91	55

Fuente: Reynoso, 2018

### **1.4.1.3 Polietileno de alta densidad**

El PEAD tiene distintos tipos de clasificaciones y la más usada en el mercado es su clasificación por densidad que puede ser:

1. Polietileno de alta densidad
2. Polietileno de alta densidad alto peso molecular (HMW-HDPE)
3. Polietileno de ultra alta masa molecular (UHMPE)
4. Polietileno modificados por entrecruzamiento

La densidad es un buen indicativo de algunas de sus propiedades ya que, si la densidad del polietileno aumenta, lo hacen también sus propiedades como:



la rigidez, dureza, resistencia a la tensión, resistencia a la abrasión, resistencia química, punto de reblandecimiento e impacto a bajas temperaturas. Este aumento de propiedades hace que disminuyan otras, como: el brillo, resistencia al rasgado y elongación.

Como ya se mencionó, el PEAD presenta muy buenas propiedades mecánicas como su rigidez, dureza y resistencia a la tensión, debido a su densidad, sus principales aplicaciones son en el sector de envase y empaque, en la industria eléctrica, en el sector automotriz, artículos de cordelería, bandejas, botes para basura, cubetas, platos, etc.

El PEAD también puede clasificarse por medio de su peso molecular, pero lo que sobresale con sus propiedades en función del peso que presenta. (Bravo, 2007)

**Tabla 1.2 Relación entre el Peso Molecular y las Propiedades de los polímeros**

<b>Propiedades en función del PM</b>	<b>Propiedades que no son función del PM</b>
Resistencia a la tracción	Densidad
Resistencia al choque	Punto de fusión
Resistencia al desgarramiento	Calor específico
Alargamiento en la ruptura por tracción	Dureza
Flexibilidad a bajas Temperaturas	Módulo de Young

Fuente: Bravo, 2007

#### **1.4.1.4 Aplicaciones y reciclaje de PEAD**

El polietileno es el plástico con mayor importancia a nivel mundial, se fabrican alrededor de 80 MTM en el mundo por año y sus usos son diversos de acuerdo con su estructura y propiedades.

El PEAD por sus características de dureza, resistencia, entre otras, es un material que puede ser sometido a diferentes procesos de transformación:

- Moldeo por soplado
- Inyección

- Extrusión
- Rotomoldeo
- Termoformado.

Sus aplicaciones más comunes son: envases para químicos, bebidas lácteas, cajones para gaseosas y cervezas, tuberías, tapas, tanques de combustible, juguetes, insumos domésticos y bolsas plásticas. (The essential Chemical Industry, 2017)

Según el producto que se requiera es un proceso de transformación distinto, para el reciclaje se debe tomar en cuenta esto, dado que los procesos térmicos a los que son sometidos cambian las propiedades de la resina virgen, por esta razón existen varias investigaciones sobre la degradación del plástico no solo por su uso, sino también por cómo fue elaborado.

Existen diferentes fuentes de degradación del plástico, esta puede ser por procesos térmicos, mecánicos, radiaciones, agentes biológicos y químicos. Según B. Bustamante, se debe realizar una adecuada selección de los materiales a reciclar, de acuerdo con sus aplicaciones. Dependiendo de la fuente de degradación se pueden producir cambios físicos o químicos en la estructura del polímero, como: ruptura de las cadenas, cristalización, entrecruzamiento de cadenas, entre otras. (Bustamante, 1994)

Las tecnologías de reciclado proponen diversos métodos de tratamiento para los plásticos que serán reprocesados:

Tratamiento primario y secundario:

El reciclaje mecánico, es el proceso de menor costo y por ello el más usado en las industrias, lo que se busca es pelletizar el polímero para llevarlo a extrusión o inyección de un nuevo producto. Lo que se debe tener en cuenta son las condiciones que se deben cumplir para disminuir la degradación termo-mecánica del material y la contaminación de la mezcla por otros residuos o plásticos incompatibles. (Arandes, Bilbao, & López, 2004)

Tratamiento terciario:

El reciclaje químico, busca aprovechar la estructura molecular de los plásticos para transformarlo en hidrocarburos, estos pueden ser reintegrados en el proceso de producción de polímeros o como materia prima para la industria petroquímica. Este método de reciclaje conlleva una descomposición química, ya sea por craqueo catalítico o por reacciones pirolíticas.

El tratamiento terciario es el proceso que da mejores resultados, ya que al descomponer por completo el polímero los contaminantes que obstaculizan o perjudican el reciclaje mecánico no afectan la recuperación de los hidrocarburos. No obstante, este método es mucho más costoso que todos los demás. (Sedrán, 2018)

Tratamiento cuaternario:

La incineración, con el fin de recuperar la energía, es un proceso perjudicial para el medio ambiente, debido a los gases tóxicos que se liberan. (Arandes, Bilbao, & López, 2004)

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

Se realizó un muestreo para analizar la calidad del plástico receptado, estas muestras fueron cortadas, lavadas y secadas de forma manual antes del ensayo de Índice de Fluidez.

Luego se realizó la elaboración de las mezclas usando la resina virgen de PEAD y el reciclado, en el laboratorio de Procesamiento de Plásticos de la Facultad de Mecánica y Ciencias de la Producción (FMCP) mediante el uso de la extrusora Brabender usando las siguientes composiciones:

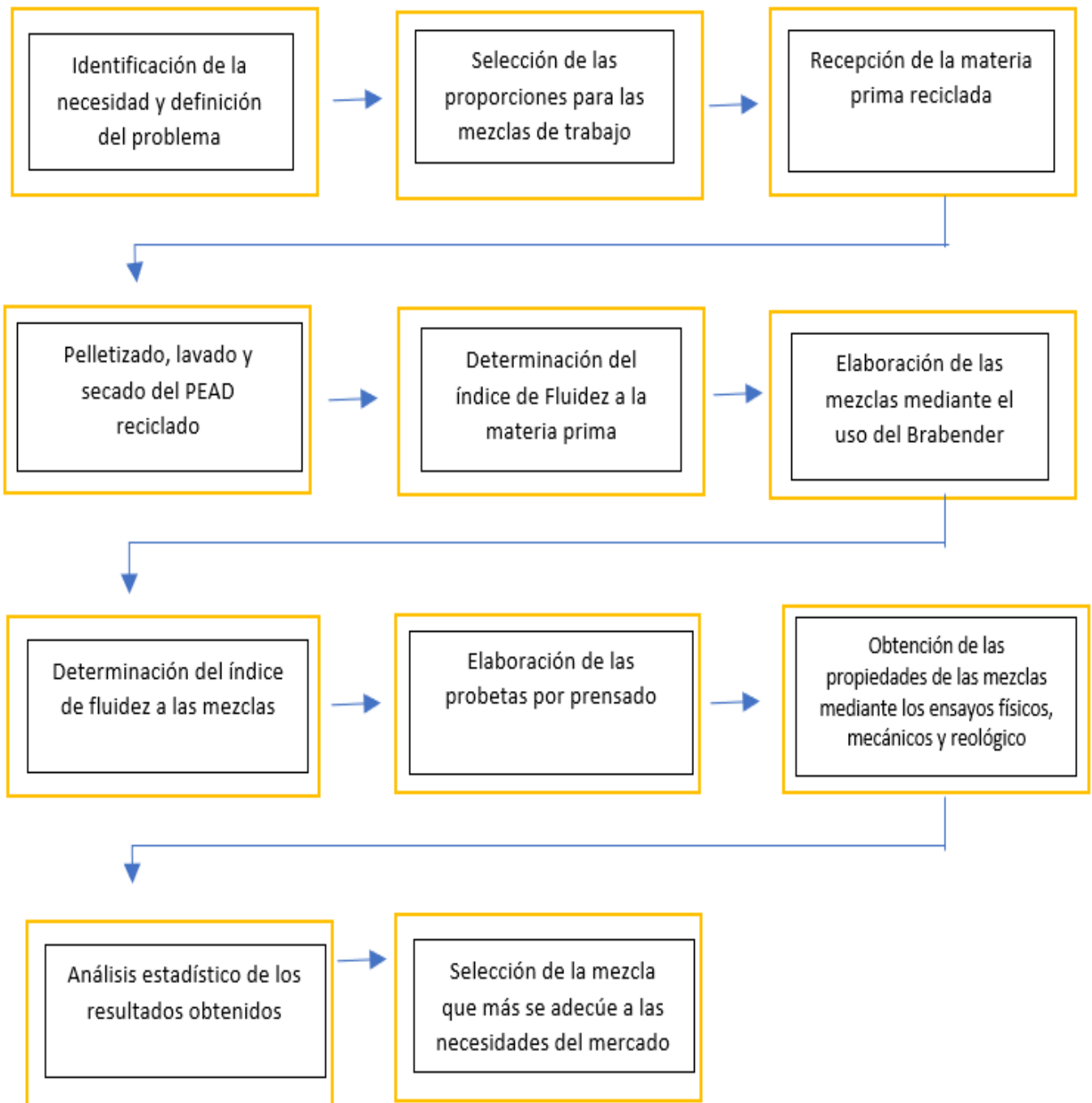
**Tabla 2.1 Porcentajes de mezclas a realizar**

<b>Reciclado (%)</b>	100	80	70	50
<b>Virgen (%)</b>	0	20	30	50

Fuente: Elaboración Propia

Los ensayos de Impacto al Dardo, Tracción, Reología, Espectrometría y Difracción se realizaron para la caracterización físico-mecánica del producto final, estos se solicitaron al Laboratorio de Ensayos a Materiales (LEMAT).

A continuación, se muestra un diagrama del proceso que se siguió:



**Figura 2.1 Diagrama de Metodología**

Fuente: Elaboración Propia

## 2.1 Evaluación de la Materia Prima

Se recibió 1kg de material por tipo de envase (yogurt, cloro, Shampoo y agua), es decir, 4 kg en total. De estos envases se necesitó pelletizar 200g para el primer análisis, el uso de una trituradora no fue posible debido a la escasa cantidad a realizar, por lo tanto, se trituró a mano seleccionando visualmente cada uno de los envases recibidos.



**Figura 2.2 Pelletización de la Materia Prima**

Fuente: Elaboración Propia

Los 200g fueron lavados con jabón neutro dejándose reposar por 3h. Con ayuda de un colador se procedió a filtrar, enjuagar con agua y se secar por 24h a temperatura ambiente.

El análisis de Índice de Fluidéz fue realizado bajo la norma ASTM D1238 método B y se utilizó el Plastómero de ASEPLAS. Se estableció una temperatura de 190 °C y 2.16Kg de peso.

El tiempo de respuesta de la muestra fue entre 400 y 800 segundos, dando además como resultados Índices de Fluidéz bastantes dispersos los cuales serán presentados y analizados en la sección de Resultados.

Al obtener los resultados se decidió no eliminar ningún envase y trabajarlos en las proporciones con las que se encuentran desechados en la basura comúnmente. A continuación, se presentarán las proporciones indicadas por la empresa recicladora.

**Tabla 2.2 Proporciones de Envases desechados en la ciudad**

<b>Envases</b>	<b>Proporciones en desechos (%)</b>
Yogurt	40
Cloro	23
Shampoo	23
Agua	14

Fuente: Empresa Recicladora de Plásticos Anónima

## **2.2 Preparación de Muestras**

Fue necesario limpiar los materiales recibidos para quitar la mayor cantidad de impurezas (restos de comida y tierra) antes de realizar el procedimiento para los análisis.

Se pelletizó el material en la trituradora del laboratorio de Procesamiento de Plásticos de la FMCP. Luego de pesar las muestras trituradas se las sumergió en 4 distintas bandejas (clasificados por el tipo de envase) que contenían una mezcla de agua y sosa, en una proporción de 1kg en 5 L de agua, como se lo muestra en la siguiente imagen:



**Figura 2.3 Lavado de la materia prima**

Fuente: Elaboración Propia

Después de 3h de reposo, se pudo apreciar la separación entre el PEAD y el material procedente de otro tipo de plástico, puesto que, por diferencia de densidad, se puede apreciar la separación entre ellos. Dado que el PEAD posee una densidad aproximada de  $0.95\text{g/cm}^3$ , flota, mientras que el resto de las impurezas se hunde. Sin embargo, en esta fase también se logró identificar restos provenientes de aleaciones de PEAD con otros plásticos no identificados, ya que estas muestras se quedaban en un espacio intermedio. Estos ejemplares fueron descartados junto con el resto de las impurezas y se recogió con un colador solo las piezas que flotaban totalmente como se presenta en las siguientes imágenes:



**Figura 2.4 Impurezas en el fondo de las bandejas**

Fuente: Elaboración Propia





**Figura 2.5 Contaminación por mezcla de material**

Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar en la Figura 2.4 que el material contaminante (posiblemente PVC con densidad de  $1.42\text{g/cm}^3$ ) posee mayor densidad que el agua causando su hundimiento durante el lavado. En la Figura 2.5 se observa la gran cantidad de materia que tuvo que ser removida, así mismo se fue separando todos los pellets que no cumplieran con las condiciones de densidad.

Terminado el lavado se procedió a enjuagar los pellets seleccionados con agua y se los esparció en bandejas para que sequen durante 24h al ambiente. Una vez limpias las muestras se realizó su pesaje para calcular el porcentaje de impurezas que presentaba.

**Tabla 2.3 Porcentaje de Impureza de las muestras**

<b>Muestra</b>	<b>Peso antes de lavar (g)</b>	<b>Peso después de lavar y secar (g)</b>	<b>Impurezas (%)</b>
Yogurt	630.1	619.2	1.73
Shampoo	898.5	796.9	11.30
Agua	913.9	906.1	0.85
Cloro	675.7	670.6	0.75

Fuente: Elaboración Propia

## 2.3 Pruebas de Índice de Fluidez

EL Índice de Fluidez (MFI, por sus siglas en inglés Melt Flow Index), es una medida que se usa para determinar la fluidez de un material fundido en g/10 min, esta es una medida indirecta del peso molecular ya que, a mayor peso molecular, menor índice de fluidez. Esta prueba se define como “la cantidad de material que fluye a través de un orificio capilar en 10 min”. (Lerma, 2017)

Mediante este también se puede conocer el tipo de proceso más adecuado para el material que se tiene.

**Tabla 2.4 Procesos según el Índice de Fluidez determinado**

PROCESO	RANGO
Extrusión (Películas)	0,01 – 6
Extrusión (Perfiles)	0,1 – 1
Moldeo por Inyección	5 – 100
Moldeo por soplado	0,1 – 1
Moldeo por rotación	5 – 20

Fuente: Curso de Materias Primas ASEPLAS

Este análisis se realizó para verificar la calidad física de los materiales provistos por la empresa, es decir, a los recipientes de yogurt, agua, shampoo y cloro.

Las condiciones del Plastómero fueron de 190 °C y 2.16 kg gramos de peso, como se lo indicó al inicio del capítulo, con mínimo dos repeticiones por cada muestra. Antes de empezar fue necesario limpiar canal del equipo donde se realiza la fundición del plástico para remover toda impureza que pueda generar dispersiones en los datos finales. Una vez limpio se pesó los 3.5 g de material pelletizados necesarios para la lectura. El tiempo de residencia en el equipo varía

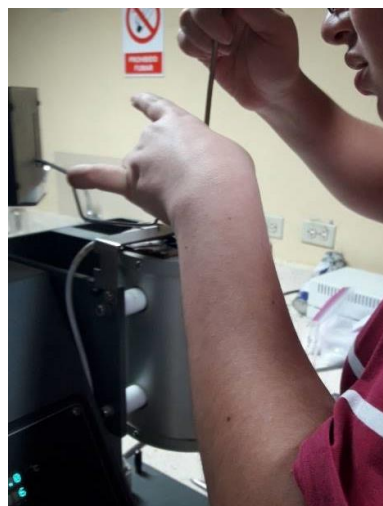
dependiendo de las características del material, a mayor índice de fluidez menor será el tiempo de residencia.



**Figura 2.6** Plastómero del Laboratorio de ASEPLAS

Fuente: Elaboración Propia

Después de la observación de los resultados se procedió a las elaboraciones de las mezclas, reciclado-virgen. Para estas se decidió trabajar con porcentajes de reciclado de: 100%, 80%, 70%, 50% y Virgen (0%).



**Figura 2.7** Limpieza del Plastómero

Fuente: Elaboración propia

## 2.4 Extrusora de doble tornillo

Las mezclas ya descritas se las trabajaron en la extrusora de doble tornillo, Brabender, del laboratorio de plásticos.

Este equipo posee una carga máxima 38g de pellet por corrida, en consecuencia, se tuvo que realizar dos veces el procedimiento para cada muestra.

Se trabajó bajo un perfil de temperatura de 185-180-185 °C y se determinó un tiempo por corrida de 15 minutos a 60 rpm por mezcla, para asegurar un resultado homogéneo.



**Figura 2.8 Extrusora de doble Tornillo, Brabender**

Fuente: Elaboración Propia

Fue necesario realizar una limpieza previa del equipo para evitar contaminación por residuos de otras muestras y así disminuir la dispersión de los datos al momento de realizar el análisis de resultados.

Una desventaja recalable de este equipo en comparación con una extrusora es que este no posee una boquilla por donde se reciba la muestra procesada. Se requirió desarmar la cavidad del equipo para poder extraer las muestras en caliente y limpiar minuciosamente los tornillos del equipo para evitar la pérdida del material.



**Figura 2.9 Material extraído de la extrusora**

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la Figura 2.9, la mezcla extraída del Brabender no cumplía con la forma ni el tamaño adecuado para la elaboración de las probetas, por consiguiente, se recurrió a pelletizarla nuevamente.

Para esta acción, se recomienda manejar la mezcla en caliente pues es más fácil manipularla debido a que su consistencia aún es blanda, si se espera a que esta se enfríe para empezar a triturarla se corre el riesgo de que el material se endurezca y dificulte el proceso.



**Figura 2.10 Proceso de cortado para la mezcla obtenida**

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 2.11 Mezcla pelletizada**

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura número 2.11 se presenta en el envase amarillo el tamaño requerido de los pellets en los moldes para la elaboración de las probetas. Como se muestra, el tamaño con el que se debe trabajar es sumamente pequeño por lo que se precisó trabajar con rapidez para evitar inconvenientes.

## 2.5 Elaboración de las probetas y Ensayos

Se elaboraron las probetas con la prensa hidráulica ubicada en el laboratorio de procesamientos de plásticos configurada a 210 °C y 3000 Psi de presión durante 10 min cada muestra. Para evitar imperfecciones causadas por la superficie irregular de la plancha, se colocaron 2 láminas de acero galvanizado en la parte superior e inferior. Como medida preventiva adicional, se puso una capa de papel antiadherente entre las láminas de acero y el molde. Finalmente se procedió a llenar en exceso cada uno de los moldes para asegurar la uniformidad de la probeta prensada. El enfriado de estas fue inmediato utilizando una bandeja de aluminio llena de agua fría.



**Figura 2.12 Prensa Hidráulica del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos**

Fuente: Elaboración Propia

Todas las probetas fueron elaboradas bajo las mismas condiciones obteniendo 4 en total para cada ensayo. Los ensayos por realizar se detallarán en la sección siguiente.

## 2.6 Caracterización de las mezclas

### 2.6.1 Resistencia al Impacto Izod

Las primeras probetas elaboradas fueron las necesarias para el ensayo de Impacto Izod (ASTM D256), esta prueba nos permite conocer la habilidad el polímero para resistir a la fractura cuando está expuesta a un impacto repentino.



**Figura 2.13 Molde para probetas de Impacto Izod**

Fuente: Elaboración Propia

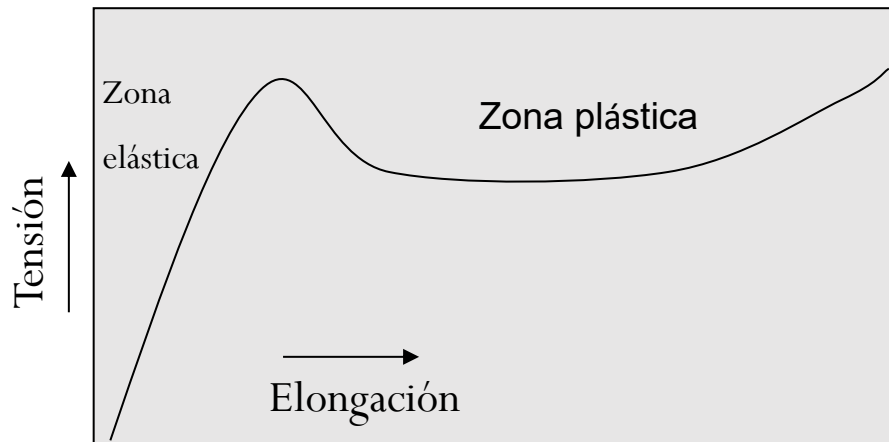
La prueba se realizó en LEMAT, el equipo mide la cantidad de energía que se requiere para romper la probeta hecha con las dimensiones establecidas por la norma.

### 2.6.2 Resistencia a la Tracción o Tensión

Este ensayo se basa en aplicar una fuerza axial a la probeta hasta que se produzca la ruptura de esta. Se utilizó la norma ASTM D638, en el equipo marca Shimadzu, modelo AG-IS de 10KN de LEMAT. Con el propósito de



conocer hasta que esfuerzo soporta el material antes de la deformación, la energía necesaria y el porcentaje de deformación al que puede llegar.



**Figura 2.14 Gráfica de Tensión vs Elongación**

Fuente: Curso de Materias Primas ASEPLAS

La Figura 2.14 muestra las dos zonas que presenta la tensión de un polímero; la zona elástica y la plástica. La elástica hace referencia el límite de fuerza que se puede aplicar sobre el material sin que esté presente una deformación permanente, es decir, sea capaz de regresar a su forma original, el punto donde termina esta zona se llama punto de fluencia y la pendiente recta que se forma en esta zona es conocida como módulo de elasticidad o módulo de Young, una propiedad que se especifica en algunas fichas técnicas de polímeros. Sin embargo, la zona plástica es todo lo contrario a la elástica, esta zona representa la cantidad de fuerza aplicable para que la deformación que presente el material sea permanente, hasta su rompimiento.

Para este ensayo las probetas a usadas fueron las siguientes, según la norma:



**Figura 2.15 Probetas para ensayo de Tracción**

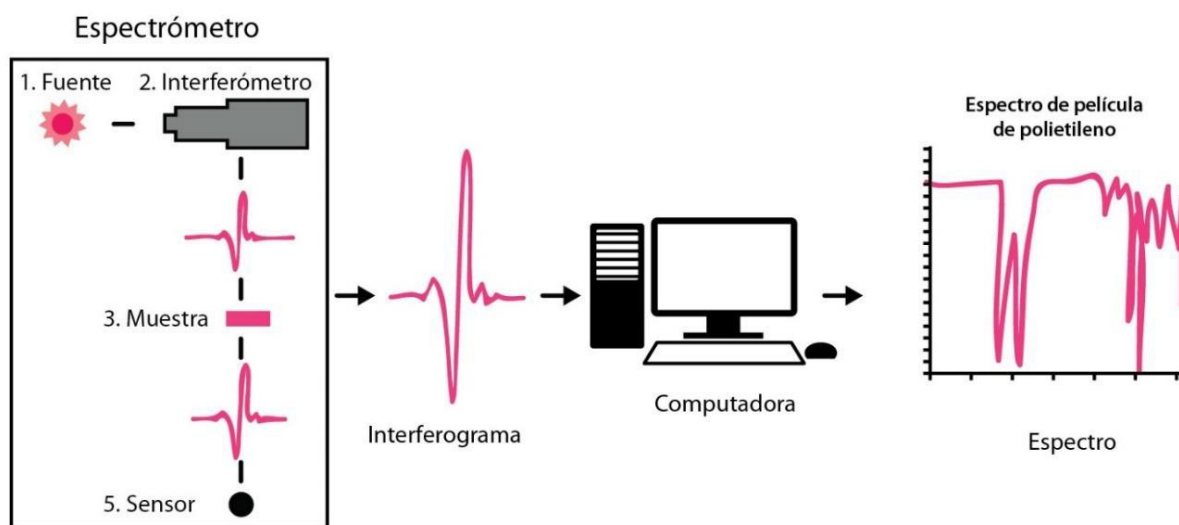
Fuente: Elaboración Propia

### 2.6.3 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Furier (FTIR)

Se propuso hacer un Análisis Infrarrojo en las mezclas realizadas para poder identificar la composición molecular que estas poseían.

La espectroscopía infrarroja es una de las ramificaciones de la espectroscopía molecular, ésta, junto con la espectrofotometría UV-vis nos permite obtener la información estructural de la molécula a analizar.

El análisis se basa en enviar un haz de luz infrarroja sobre la cadena y así generar vibraciones entre los átomos de sus moléculas. Estas vibraciones son específicas para cada grupo funcional y se traducen, por medio de un detector, en forma de espectros. (Velandia Cabra, 2017)



**Figura 2.16 Diagrama de funcionamiento de un espectrómetro infrarrojo**

Fuente: Baquerizo, 2008

Para el FTIR el LEMAT utiliza un método interno. Se elaboraron películas de muy poco espesor usado solo la prensa para este análisis.

En la siguiente tabla se muestran los rangos de onda donde se presentan las vibraciones en los espectros:

**Tabla 2.5 Rangos de onda de acuerdo con las vibraciones en los espectros.**

Rango de Onda (cm <sup>-1</sup> )		Descripción
2967	2915	Vibraciones enlaces C-H saturados
2910	2845	Vibraciones Enlaces C-H
1737	1710	Estiramiento del grupo carbonilo del PET (C=O)
1479	1469	Vibraciones de Cadenas CH <sub>2</sub>
1325	1300	Vibraciones de alcanos ramificados
730	717	Vibraciones de cadenas CH <sub>2</sub>

Fuente: Baquerizo, 2008

#### **2.6.4 Reología**

La viscosidad es una de las propiedades reológicas de los polímeros y se define por ser la medida de resistencia a las deformaciones producidas por tensiones cortantes o esfuerzos de tracción medido en términos de velocidad. Esta propiedad se ve afectada también por la temperatura ya que son inversamente proporcionales. (Jimmy Gómez, 2007)

Este ensayo reológico ayuda a determinar cómo varía la viscosidad en función a la velocidad de un proceso determinado, en casos de polímeros, se analiza mayormente para determinar el proceso de extrusión, donde la velocidad del tornillo debe ajustarse de acuerdo a la viscosidad del polímero, debido a que esta es directamente proporcional a los esfuerzos cortantes, de esta forma, se le proporciona al operador la información necesaria para que pueda ajustar y optimizar los parámetros del proceso.

Esta propiedad puede ser determinada con la ayuda de distintos equipos, entre ellos el Reómetro Capilar. Un viscosímetro capilar consta esencialmente de cuatro partes: un depósito de líquido, un capilar de dimensiones conocidas, un dispositivo de control y medida de la presión aplicada y un dispositivo para determinar la velocidad de flujo.



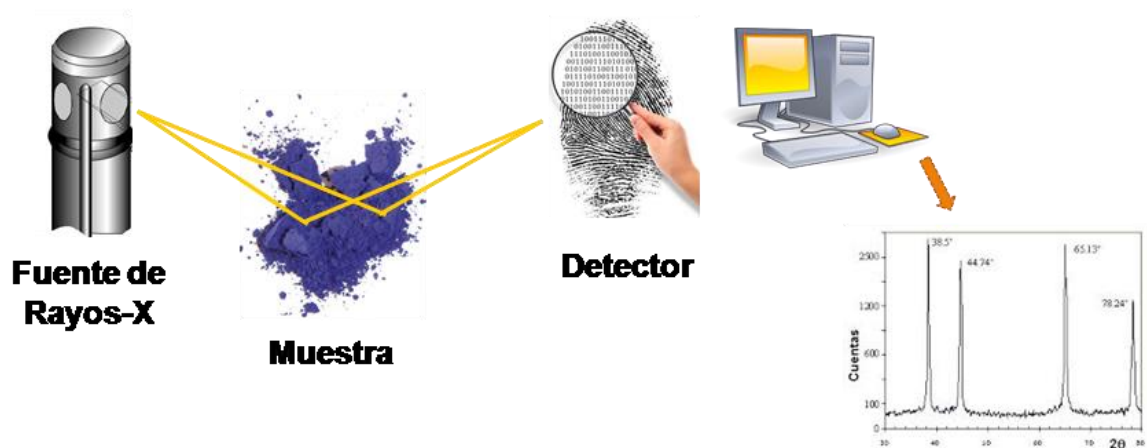
**Figura 2.17 Moldes para probetas de Viscosidad**

Fuente: Elaboración Propia

Para este proceso se elaboraron las probetas en el molde presente en la Figura 2.17, este ensayo fue realizado con el reómetro ubicado en el Laboratorio de Microscopía de la Facultad de Mecánica bajo las normas ASTM D3835 y D5099.

### **2.6.5 Dispersión por rayos X**

Como ya se mencionó en el capítulo 1 los polímeros pueden clasificarse entre cristalinos, semicristalinos y amorfos, estas estructuras al ser expuestas a distintas radiaciones electromagnéticas causan una difracción única en estos rayos. Estas difracciones son transformadas por un detector en picos los cuales se los presenta en un cromatograma y pueden ser interpretados según su ancho e intensidad. A esta técnica se la conoce como Difracción de Rayos X y se representa en la imagen a continuación:



**Figura 2.18 Esquema de Difracción por Rayos X**

Fuente: Laboratorio de Procesamiento de Plásticos (Rigaku , 2014)

La difracción de Rayos X nos permite conocer de forma cualitativa y cuantitativa el porcentaje de cristalinidad de un compuesto, según este resultado, se pueden derivar algunos análisis para conocer también sus propiedades mecánicas, térmicas y de opacidad.

La cristalinidad es un factor importante según el tipo de producto que se desee, para algunas empresas este dato forma parte de su análisis de calidad.

Este ensayo se realizó en el laboratorio de microscopía de mecánica utilizando las mismas láminas elaboradas para el ensayo de FTIR bajo método interno.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Resultados Prueba de Índice de Fluidez

El Índice de fluidez fue la primera prueba a realizar. Como ya se mencionó, este análisis permite tener una visión general del estado en el que se encuentra la materia prima por lo que se decidió realizar 4 corridas para cada muestra como se aprecia en la Tabla 3.1. Las condiciones en la cual fue ejecutada esta prueba son las dictadas por la norma ASTM D1238, es decir, 190°C/2.16 Kg con un esfuerzo cortante de 19585 Pa.

**Tabla 3.1 Resultados de MFI ASTM D1238 a muestras**

<b>Muestra</b>	<b>MFI (g/10 min)</b>	<b>Viscosidad (MPa/s)</b>	<b>Velocidad Cortante (1/s)</b>
Yogurt	0.765 ± 0.014	10.42 ± 0.20	1.865 ± 0.035
Cloro	0.496 ± 0.005	13.05 ± 3.79	1.178 ± 0.013
Shampoo	0.349 ± 0.003	23.82 ± 0.22	0.822 ± 0.008
Agua	0.236 ± 0.006	34.72 ± 0.80	0.565 ± 0.013

Fuente: Elaboración Propia

Los tiempos obtenidos variaron entre 400 segundos para el yogurt y 800 segundos para las botellas de agua, dado que a mayor índice de fluidez menor tiempo el análisis. Por cada muestra añadida el equipo arroja 4 mediciones.

Dentro de la Tabla 3.1 lo más destacable son las variaciones de MFI con la Viscosidad y la Tasa Cortante. EL MFI es una medida indirecta del peso molecular, a mayor índice de fluidez menor longitud tiene la cadena por ende menor resistencia a fluir, de la misma forma, mientras más corta sea la cadena, la tasa de deformación (Velocidad cortante) aumenta.

Los envases de yogurt eran los más pequeños, con capacidades menores de 1L, a diferencia de los demás envases, para los procesos de soplado se tiene en cuenta que los envases de mayor capacidad deben tener un MFI menor, ya que su viscosidad es mayor y requieren una gran resistencia, como se puede observar el envase de agua es el de menor MFI, estos son usualmente galoneras, fueron los envases más grandes dentro de las muestras.

Se realizó el ensayo de MFI a la mezcla de reciclado antes de pasar por el proceso de extrusión, dando los siguientes resultados:

**Tabla 3.2 Ensayo MFI según Norma ASTM D1238 a PEAD reciclado y virgen.**

Mezcla Reciclado	MFI (g/10 min)	Viscosidad (MPa/s)	Tasa Cortante (1/s)
100%	0.497 ± 0.014	16.60 ± 0.45	1.183 ± 0.0325
Virgen	0.358 ± 0.005	22.86 ± 0.35	0.86 ± 0.014

Fuente: Elaboración Propia

De la misma forma se realizó el ensayo de índice de fluidez a cada una de las mezclas realizadas.

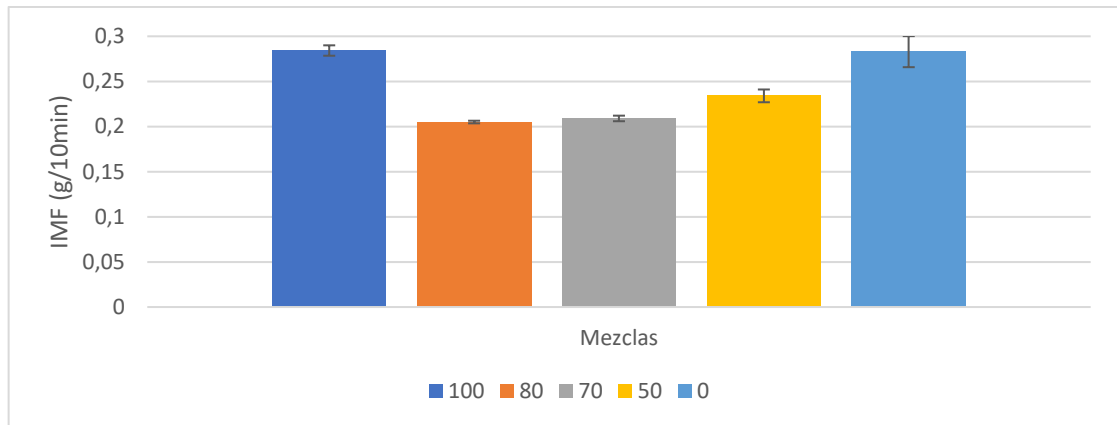
**Tabla 3.3 Resultados de MFI ASTM D1238 a mezclas.**

Mezclas PEAD (Reciclado-Virgen) %	MFI (g/10 min)	Viscosidad (MPa/s)	Tasa Cortante (1/s)
100-0	0.284 ± 0.006	28.53 ± 0.63	0.650 ± 0.02
80-20	0.205 ± 0.002	39.57 ± 0.23	0.495 ± 0.003
70-30	0.209 ± 0.003	39.20 ± 0.64	0.500 ± 0.008
50-50	0.234 ± 0.007	34.91 ± 1.02	0.563 ± 0.017
0-100	0.283 ± 0.017	28.74 ± 1.16	0.620 ± 0.143

Fuente: Elaboración Propia

El MFI obtenido del virgen antes de la extrusión es de 0.358 g/10 min y después es de 0.283 g/10min, mientras que el reciclado 100% antes de la extrusión tuvo un MFI de 0.497 g/10min y luego de 0.284 g/10min. Se puede observar que hay

una gran diferencia con la mezcla al salir del equipo, el material reciclado ya ha sido sometido a otros procesos, existe un cambio mayor en el polímero, que afecta sus propiedades mecánicas y a su estructura, a diferencia del virgen, que es por primera vez sometido a un proceso termo-mecánico.



**Figura 3.1 Índice de Fluidez de cada una de las mezclas realizadas**

Fuente: Elaboración Propia

Mediante este análisis podemos observar en la Figura 3.1 que a mayor porcentaje de reciclado el MFI decrece, debido a que un polímero reciclado ha sufrido ya una degradación termo-mecánica tras su transformación en un producto comercial.

Dependiendo del proceso de polimerización de cada plástico, según los catalizadores expuestos en el capítulo 1, la degradación en los plásticos provoca el rompimiento de las cadenas largas del polímero (catalizador Phillips), incrementando con cada proceso su MFI; como también puede dar paso a un entrecruzamiento de las cadenas poliméricas, si estas son cortas (catalizador Ziegler-Natta), disminuyendo su MFI. (Rigail, 2006)

El material virgen utilizado tiene un MFI de 0.283 g/10min, siendo así que la diferencia es mínima entre las mezclas, de 0.284 g/10min el máximo (mezcla 100% reciclado) a 0.205 g/10min (mezcla 80% reciclado), considerando que está dentro del rango de MFI para procesos de extrusión por soplado, se considera que la degradación sufrida por el material es despreciable.



### 3.2 Resistencia al Impacto IZOD ASTM D256

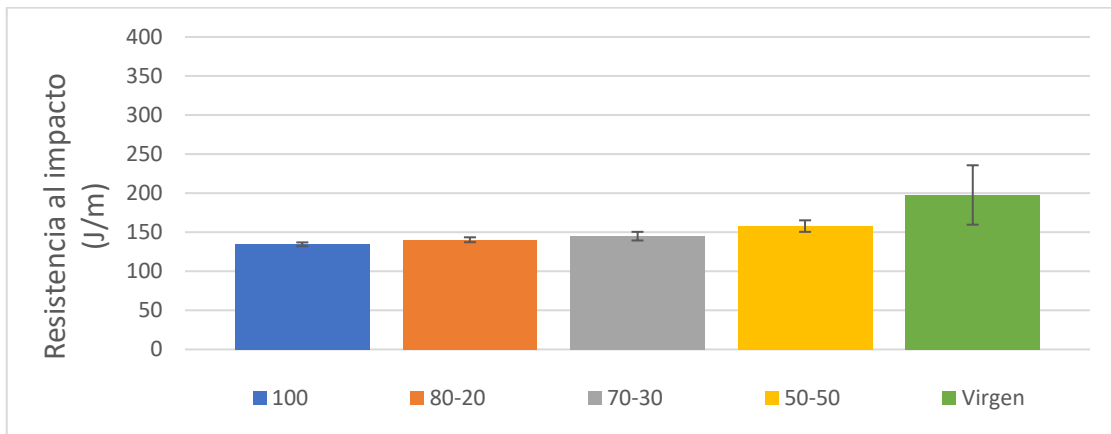
Se realizó el análisis de la resistencia al impacto, obteniendo los siguientes datos detallados en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Resultados de Resistencia al Impacto IZOD ASTM D256**

Mezclas PEAD (Reciclado-Virgen) %	Resistencia al Impacto (J/m)	Diferencia %
100-0	134.56 ± 2.46	32.04
80-20	140.41 ± 3.15	26.43
70-30	145.02 ± 5.53	26.65
50-50	157.94 ± 7.38	20.12
0-100	197.72 ± 32.60	0

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar la resistencia al impacto va decreciendo conforme el porcentaje de PEAD reciclado aumenta, la resina virgen tiene la mayor resistencia al impacto con un 197.72 J/m, mientras que el 100% reciclado tiene 134.56 J/m. La máxima diferencia entre el virgen y reciclado es del 32%, lo que muestra una pérdida de resistencia al impacto por la degradación del material.



**Figura 3.2 Resistencia al impacto IZOD en comparación con % de PEAD reciclado**

Fuente: Elaboración Propia

En procesos de soplado se usa comúnmente PEAD con un rango de 125 hasta 250 J/m, por lo que las mezclas no se ven tan afectadas en cuanto su resistencia. (Ver Apéndice C)

### 3.3 Resultados Resistencia a la Tracción

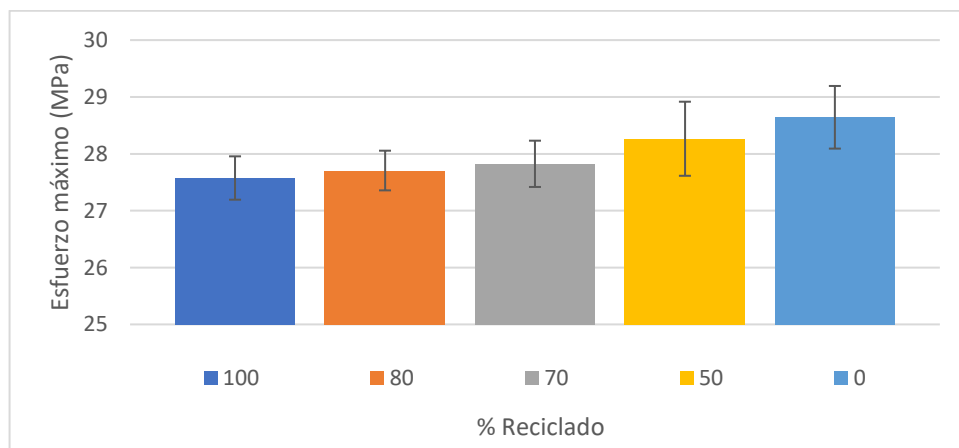
Se realizaron análisis de resistencia a la tracción, 4 probetas por mezcla, dando los siguientes resultados.

**Tabla 3.5 Resultados de Resistencia a la Tracción ASTM D638**

Mezclas PEAD (Reciclado-Virgen) %	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Alargamiento punto de fluencia (%)
100-0	27.57 ± 0.38	423.54 ± 4.44	16.11 ± 0.12
80-20	27.70 ± 0.34	421.96 ± 10.38	17.01 ± 0.64
70-30	27.82 ± 0.41	409.21 ± 5.61	16.24 ± 1.35
50-50	28.27 ± 0.65	405.02 ± 11.5	16.85 ± 1.23
0-100	28.64 ± 0.55	402.14 ± 7.04	22.76 ± 0.84

Fuente: Elaboración propia

El ensayo de resistencia a la tracción muestra el esfuerzo máximo, que para el PEAD comúnmente coincide con el esfuerzo en el punto de fluencia, siendo el esfuerzo máximo que puede alcanzar antes de la deformación, todas las pruebas coinciden con esta tendencia (Figura 2.14).

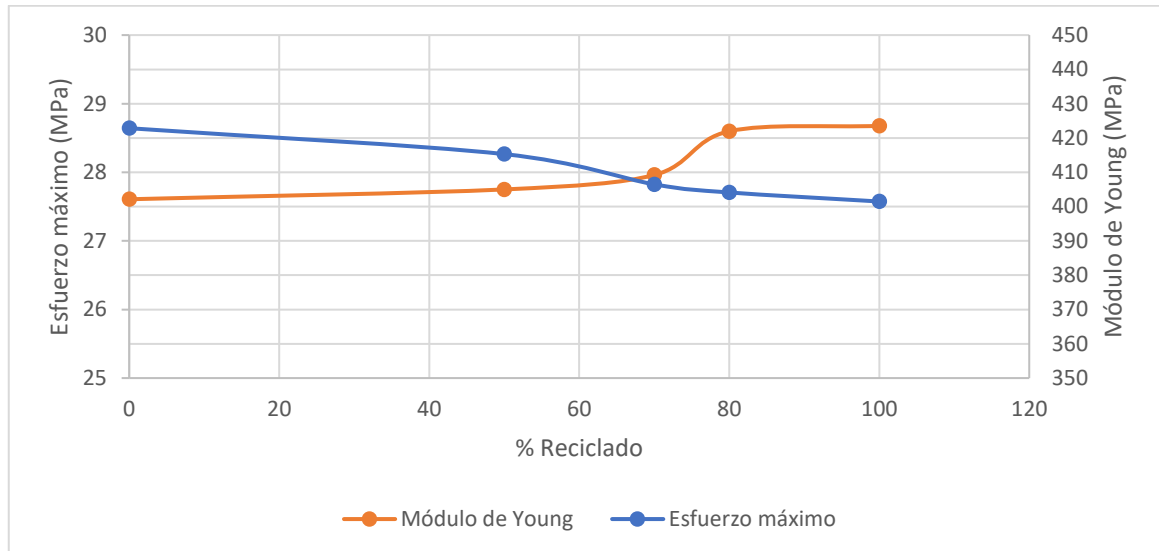


**Figura 3.3 Esfuerzo Máximo (MPa) aplicado a cada mezcla**

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la Figura 3.3 las mezclas de reciclado 100%, 80%, 70%, 50% y virgen tienen un esfuerzo máximo entre 27.57 MPa y 28.64 MPa, con un porcentaje de diferencia del 3.74% lo que nos muestra que el material no ha perdido su resistencia a la tensión. Sin embargo, la deformación en el punto

de ruptura varía mucho entre ellas, siendo la mezcla virgen la que llega a 336.06% de elongación, demostrando que ser un material con mayor plasticidad y fuerza en sus cadenas poliméricas.



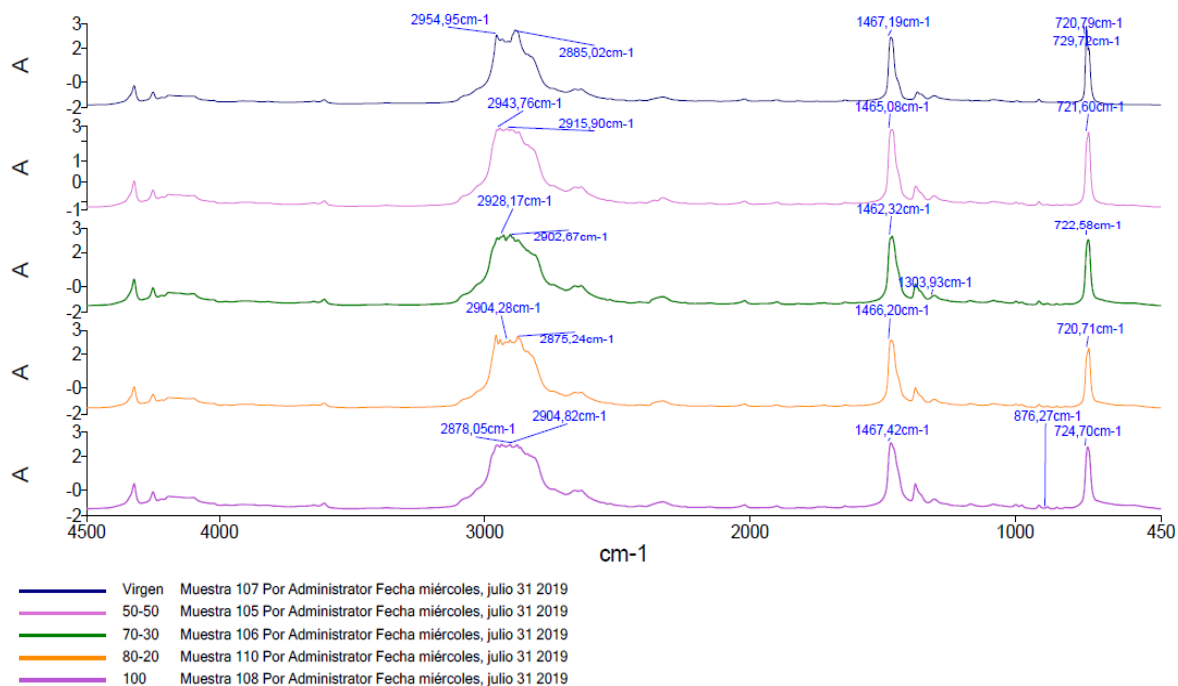
**Figura 3.4 Comparación entre el Módulo de Young y el Esfuerzo Máximo**

Fuente: Elaboración Propia

También se calculó el Módulo de Young o de elasticidad, que es la pendiente en la zona de fluencia (Figura 2.14), donde el polímero no se deforma, en la Figura 3.4 se puede observar que se comporta inversamente proporcional al esfuerzo máximo, dado que el porcentaje de alargamiento en la zona de fluencia es casi el mismo en todas las mezclas, el módulo varía en función del esfuerzo alcanzado en esta zona. Alcanzando un promedio de 412 MPa, no existe una variación relevante entre las mezclas, estando todas dentro del margen considerado de resinas virgen de PEAD.

### 3.4 Resultados FTIR

Cada enlace químico tiene su propia frecuencia de vibración según su nivel de energía, la espectrometría infrarroja nos permite saber cuáles moléculas están presentes en las mezclas realizadas y poder determinar si hay o no contaminación y si esta es significativa.



**Figura 3.19 Espectrograma FTIR de las mezclas**

Fuente: Elaboración Propia

El espectrograma presentado en la Figura 3.5 es una representación visual de la composición molecular de las cinco mezclas realizadas, en este se puede apreciar que las cinco muestras presentaron composiciones similares y con diferencias casi inexistentes. En el Apéndice A se pueden ver los espectrogramas individuales.

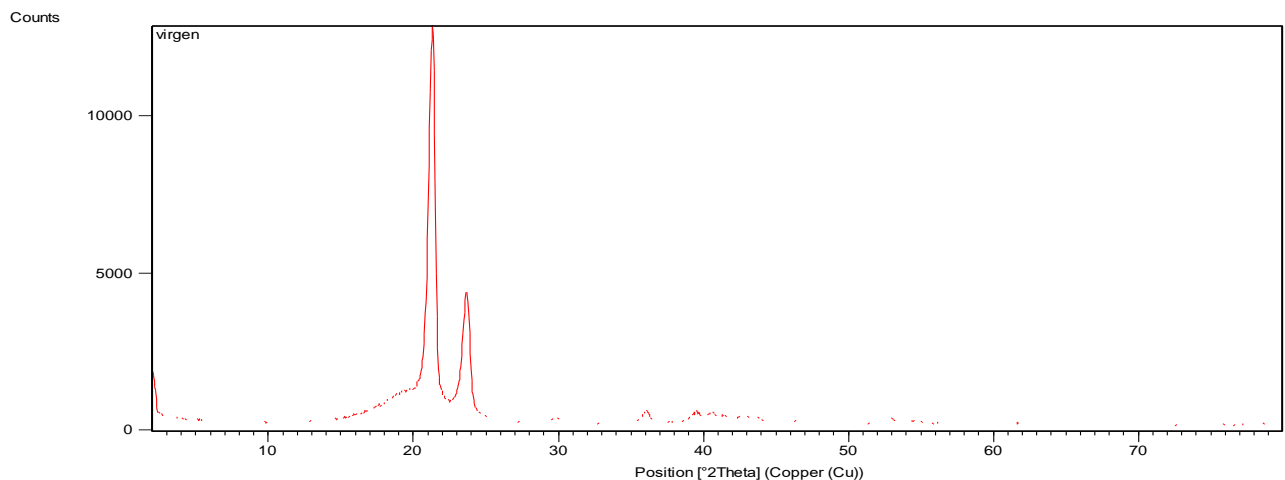
El primer pico denota cómo la intensidad de los enlaces C-H no saturados van disminuyendo conforme aumenta el porcentaje de reciclado lo que puede significar que estos enlaces se ven ligeramente afectados al pasar por un proceso térmico o mecánico dando una degradación máxima del 2.6 % en la mezcla del 100% reciclado. El siguiente pico de gran intensidad se encuentra en una longitud de onda de  $1467 \text{ cm}^{-1}$ , este también es representativo en la composición de los polietilenos pues indica las vibraciones de las cadenas de  $\text{CH}_2$  típicas de este polímero, no obstante, junto a este pico se muestra una pequeña irregularidad o bulto que va en aumento conforme la concentración de reciclado crece, este se encuentra en el rango de onda de  $1325\text{-}1300 \text{ cm}^{-1}$

representando así a las vibraciones de los alcanos ramificados. Este pico revela que a medida que el porcentaje de reciclado aumenta las ramificaciones en la cadena crecen, estas pueden llegar a causar debilidad y fragilidad en la estructura final del polímero, aunque por la intensidad leída se puede concluir que este no es un problema significativo. (Ver Tabla 2.5)

Finalmente, se analizó la presencia de enlaces C=O (característicos de los PET) para conocer si existía contaminación por este material, debido a que durante el proceso de limpieza de los envases se identificó uno con las características de este último, no obstante, el espectrograma no mostró ningún tipo en el rango de onda de 1737 a 1710 por lo que se puede concluir que los envases reciclado son 100% polietileno de alta densidad.

### 3.5 Análisis XRD

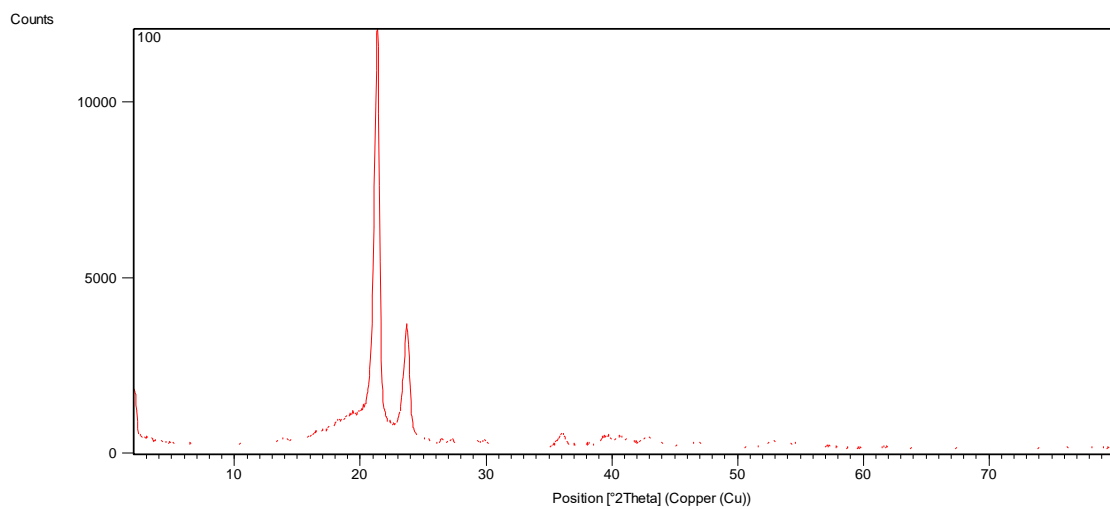
La cristalinidad de un material influencia sus características mecánicas, térmicas y de opacidad, para la industria este último suele ser un indicativo de calidad para ciertos productos. El análisis por Difractómetro de Rayos X nos ayuda a determinar de manera visual y cuantitativa el porcentaje de cristalinidad del compuesto, en caso de hablar de aleaciones con metales o minerales, se puede determinar la fase cristalina en la que este se encuentra.



**Figura 3.20 Difractograma de la muestra Virgen**

Fuente: Elaboración Propia

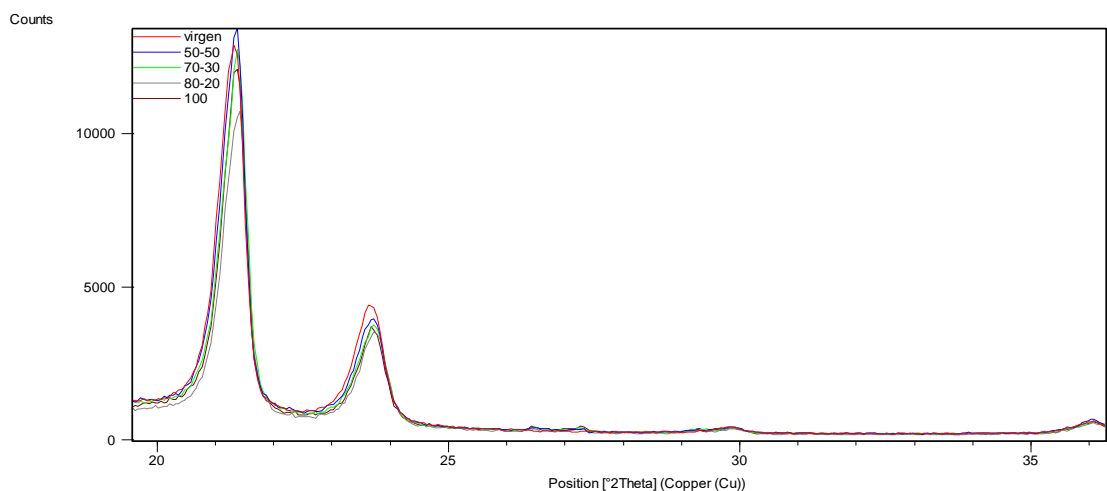
La Figura 3.6 muestra el difractograma obtenido de la muestra virgen, es decir, representa el patrón de difracción del polietileno de alta densidad puro. Este polímero semicristalino se caracteriza por presentar zonas donde coexisten su estado amorfo y cristalino. Este último se ve claramente representado por los dos picos intensos y bien definidos ubicados en las posiciones  $2\theta$  de 21 y 23 grados.



**Figura 3.721 Difractograma Mezcla 100% Reciclado**

Fuente: Elaboración Propia

La Figura 3.7 nos muestra el difractograma obtenido por la mezcla del 100% reciclado. Como se puede apreciar, entre ambos gráficos no existe diferencia significativa en lo referente a intensidad y ubicación gradual de los picos prioritarios.



**Figura 3.8 Overlay de Difractogramas**

Fuente: Elaboración Propia

Para poder realizar un mejor análisis comparativo se decidió realizar una sobreposición (Overlay) de cada uno de los difractogramas obtenidos de las muestras, tal como lo muestra la Figura 3.8. En este Overlay se puede percibir que la mezcla con menor intensidad es la del 80-20% llegando aproximadamente a los 1100 u. a, no obstante, las intensidades de los picos en las mezclas restantes son muy cercanas.

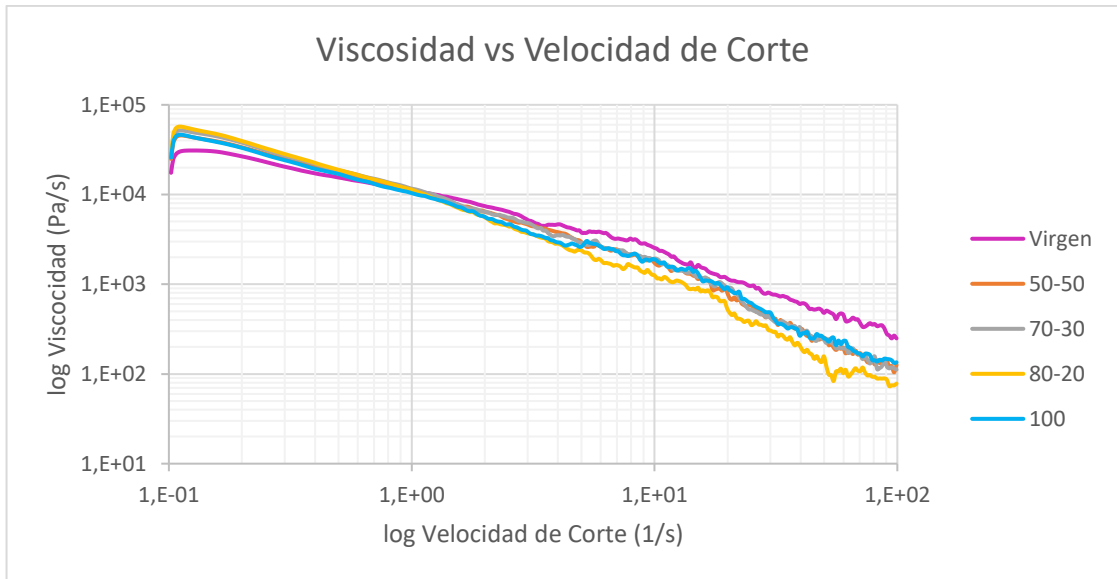
El polietileno virgen posee un rango de cristalinidad entre el 95 y 55% (ver tabla 1.1). Acorde a densidad de la resina usada para la elaboración de las mezclas ( $0.954 \text{ g/cm}^3$ ), se obtiene un porcentaje aproximadamente del 72%, por lo que, a excepción de la mezcla 80-20, las mezclas resultantes se encuentran entre el 70 y 75% de esta propiedad. En el Apéndice B se pueden ver los difractogramas individuales.

La cristalinidad puede favorecer o perjudicar el producto dependiendo de la disposición final que este vaya a tener. Este proyecto tiene como finalidad formular una mezcla para la elaboración de envases de recipientes químicos, para este propósito se requiere un material opaco puesto que la luz puede llegar a degradar los componentes químicos presentes. Acorde a lo anterior, se puede inferir que la mejor mezcla es la de 80-20.

### **3.5 Viscosidad**

Se define Viscosidad como la razón entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. El reómetro es un instrumento que ayuda a entender cómo se va a comportar el material a ciertas condiciones. (U. Santa María de Chile, 2016)

La Figura 3.9, muestra el comportamiento obtenido de cada una de las mezclas elaboradas. A partir de esto se denota que el comportamiento de nuestro material es el de un pseudoplástico, es decir, la viscosidad desciende con forme aumenta la velocidad de corte a una determinada temperatura, lo cual cumple con las condiciones de un proceso de extrusión.



**Figura 3.9 Diagrama logarítmico de Viscosidad respecto a la velocidad de corte**

Fuente: Elaboración Propia

Es notorio que al inicio de la gráfica las mezclas no presentan comportamientos sumamente distintos, la mezcla con mayor viscosidad es la de 80-20 con un valor de  $3.07E+04$  Pa/s y el más bajo es el Virgen con un valor de  $1.75E+04$  Pa/s, en cambio, con forme aumenta la velocidad de corte las posiciones se van invirtiendo terminando con la mezcla de 80-20 siendo la menos viscosa y la virgen lo contrario, es decir, las viscosidades de los reciclados disminuyen ligeramente más a comparación del virgen cuando son sometidos a un proceso.

De esta gráfica se obtiene la velocidad a la que debe ser manejado el tornillo según la velocidad de corte que se desee aplicar;

$$\gamma = \frac{\pi DN}{\delta} \tag{3.1}$$

Donde:

$\gamma$  = Velocidad de Corte

$N$  = Velocidad del Tornillo

$\delta$  = Distancia entre hélice y canal

$D$  = Diámetro del tornillo



La velocidad de corte, para un proceso de extrusión, varía normalmente entre 1 y 100 (1/s) mientras que la tasa de corte se encuentra en un rango de 60 a 100 (1/s) (LEMAT, 2011). Tomando esto en consideración y la baja dispersión de los datos obtenidos, se considera que todas las mezclas son aptas para el propósito final, planteado en el capítulo 1.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

El análisis realizado al material reciclado mostró las diferencias que existen entre los índices de fluidez con relación a la capacidad de los envases, siendo el MFI de las galoneras de agua  $0.236\text{g/cm}^3$ , mientras que el de yogurt, donde los envases no llegaban a ser más grandes que de 1L, fue de  $0.765\text{g/cm}^3$ . Por lo que se puede decir que, en cuanto a proceso, a mayor capacidad, el MFI del envase debe ser mayor.

Las mezclas de 100% Reciclado y Virgen fueron analizadas en primera instancia sin pasar por la extrusora para estudiar si existía algún cambio en sus propiedades físicas. Los resultados del MFI fueron de  $0.49\text{ g/cm}^3$  y  $0.35\text{ g/cm}^3$  respectivamente, no obstante, una vez que estas mezclas fueron expuestas a un proceso térmico-mecánico se presenció que sus índices de fluidez disminuían. De acuerdo con Andrés F. Rigail “Los polietilenos polimerizados por Ziegler-Natta disminuirán su fluidez mientras que los polietilenos polimerizados por Phillips la incrementarán dependiendo del número de veces de procesamiento” (Rigail, 2006), acorde a los mencionado se puede concluir que el origen de las resinas con las que se hicieron los envases reciclados, aunque es desconocido, muestran unas propiedades mecánicas acorde con el procesamiento con Ziegler-Natta, al igual que la resina virgen que se utilizó. A medida que el porcentaje de material reciclado aumenta el MFI decrece, debido a que el entrecruzamiento de las cadenas es mayor en los reciclados por las ramificaciones producidas tras la degradación del material.

Los análisis de resistencia al impacto muestran un 100% reciclado con  $134.56\text{J/m}$ , con una diferencia del 32.04% con respecto al virgen, estando aun así dentro de los parámetros permitidos para procesos de soplado. La resistencia a la tracción revela un decrecimiento casi imperceptible a mayor porcentaje de

reciclado, menor al 4% relación al virgen, por lo que podemos concluir que los resultados obtenidos por los análisis presentaron poca dispersión, lo que nos permite estimar que las propiedades de los materiales reciclados, originarios de un proceso de extrusión por soplado, no varían significativamente cuando son mezclados entre sí y siguen siendo aptos para desempeñar nuevamente el proceso ya mencionado.

Dadas las probabilidades de contaminación que tiene el material desde el proceso de recolección hasta llegar a la recicladora fue necesario hacer una prueba de densidad para eliminar todo el material que no cumplía con los requerimientos, lo cual contribuyo a la baja dispersión por contaminación mostrada en los espectrogramas de FTIR. Los difragtogramas al ser comparados no manifiestan una gran diferencia entre sí, siendo la cristalinidad semejante entre todas las muestras.

Finalmente, se concluye que el polietileno de alta densidad, aun siendo 100% reciclado, es apto para servir como materia prima para el proceso de soplado, si bien no para envases de la industria alimentaria por motivos de salubridad, existen varias aplicaciones para este material, como se describió en el capítulo 1.

Esta investigación también demuestra que es importante una buena gestión de los residuos plásticos, permitiendo mejor calidad de la resina para la elaboración de nuevos productos. El polietileno de alto peso molecular conserva sus propiedades a pesar de los tratamientos térmicos aplicados, por lo tanto, una correcta separación de los polímeros desechados evita un producto de mala calidad por incompatibilidad entre las moléculas.

## **Recomendaciones**

En cuanto al procesamiento de las muestras, es vital mantener fijos los parámetros a usar. A pequeña escala cualquier variación puede causar dispersión en los datos y errores al momento de analizar los resultados, además,

es recomendable que todas las muestras sean manipuladas bajo los mismos procedimientos y equipos puesto que las exposiciones a temperatura y esfuerzos mecánicos alteran las propiedades iniciales del material.

Para futuros análisis se propone realizar el ensayo Environmental Stress Cracking (ESC) ya que este tipo de agrietamiento por estrés ambiental es una de las fallas más comunes en los polímeros termoplásticos sobre todo a aquellos que sirven como almacenamiento de productos químicos, pues estos últimos tienden a acelerar el fraccionamiento.

Finalmente, se subraya que las mezclas analizadas fueron elaboradas a nivel de laboratorio, por lo tanto, se recomienda retomar este estudio a nivel industrial.

# BIBLIOGRAFÍA

- Arandes, J., Bilbao, J., & López, D. (2004). Reciclado de Residuos Plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 28-45.
- Baquerizo, L. (2008). Estudio de la Relación Estructura-Propiedades de Barrera en Nanocompuestos a base de Resinas Epóxicas y Arcillas. *Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción*. Ecuador: ESPOL.
- Barbosa, G. O. (2006). TERMOPLÁSTICOS EN LA INDUSTRIA. *SENA(52)*. Obtenido de <http://revistas.sena.edu.co/>
- Bravo, A. (2007). *Evaluación de Polietilenos de Alta Densidad Reciclado para Aplicaciones en mobiliario Urbano*. Guayaquil, Ecuador: Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, ESPOL.
- Bustamante, B. (1994). La degradación de los plásticos. *Universidad Eafit No 94*, 67-86.
- Comisión Petroquímica Mexicana, S. d. (2002). *Anuario Estadístico de la Industria Petroquímica*.
- El Comercio*. (28 de Abril de 2017). Obtenido de <https://www.elcomercio.com/tendencias/ecuador-deficit-reciclar-basura-contaminacion.html>
- Extra, D. (Agosto de 2016). *En Guayaquil se recoge hasta 100 toneladas diarias de basura de las calles*. Obtenido de <https://www.extra.ec/actualidad/guayaquil-basura-municipio-desechos-recoleccion-EA626987>
- Hataway, J. (1 de Julio de 2017). *UGA participates in calculation of global plastics production*. Obtenido de UGA Today: <https://news.uga.edu/scientists-calculate-total-amount-of-plastics-ever-produced/>
- Herrera, F. (2011). *Cristalinidad de los Polímeros*. Obtenido de [http://educommons.anahuac.mx:8080/eduCommons/ciencia-de-los-materiales-y-metalurgia/ciencia-de-los-polimeros/TEMA03\\_Cristalinidad%20en%20los%20polimeros.pdf](http://educommons.anahuac.mx:8080/eduCommons/ciencia-de-los-materiales-y-metalurgia/ciencia-de-los-polimeros/TEMA03_Cristalinidad%20en%20los%20polimeros.pdf)
- INEC, I. (2014). *Información Ambiental en Hogares*. Ecuador.
- INEN, S. (2019). *Servicio Ecuatoriano de Normalización*. Obtenido de Ecuador proyecta una producción sostenible a través de una Norma Técnica basada en Economía

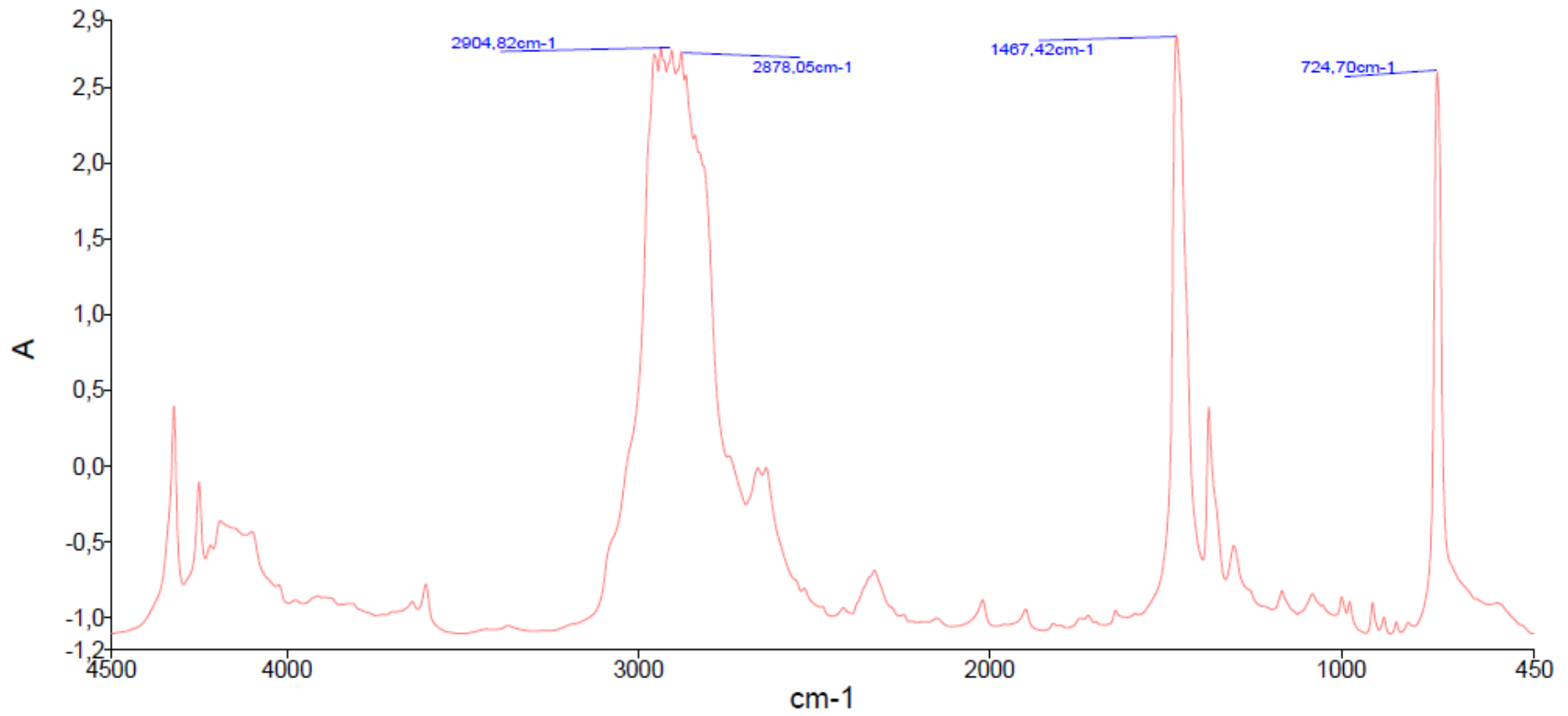
- Circular: <https://www.normalizacion.gob.ec/ecuador-proyecta-una-produccion-sostenible-a-traves-de-una-norma-tecnica-basada-en-economia-circular/>
- Jimmy Gómez, J. G. (2007). *Diseño de una extrusora para plásticos*. Pereira- Risaralda.
- LEMAT. (2011). *Aplicaciones del Reómetro*. Ecuador.
- Lerma, J. R. (2017). *Interempresas*. Obtenido de <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/193925-Indice-de-fluidez-su-importancia-real.html>
- MAE, M. (2014). POLITICAS PARA GESTION INTEGRAL DE PLASTICOS. *Acuerdo ministerial 19*. Quito.
- Ministerio de industrias y productividad. (24 de Noviembre de 2011). Obtenido de <https://www.industrias.gob.ec/impuesto-redimible-a-las-botellas-plasticas-no-retornables-pet/>
- Municipalidad de Guayaquil. (Septiembre de 2018). Gaceta oficial. Guayaquil, Ecuador.
- Newell, J. (2011). *Ciencia de materiales, aplicaciones en ingeniería*. México: Alfaomega.
- Reynoso, S. L. (07 de Agosto de 2018). Los polímeros plásticos. Obtenido de <https://todoenpolimeros.com/2017/08/07/polietileno-de-ultra-alto-peso-molecular/>
- Rigail, A. (2006). Aplicaciones del Melt Flow Index (MFI) en la industria de procesamiento de plásticos. *Revista tecnológica ESPOL*, 79-84.
- Rigaku* . (2014). Obtenido de <https://www.rigaku.com/es/applications/polymers>
- Sedrán, U. (2018). *Reciclado energético de plásticos: coprocesamiento en refinerías y craqueo térmico*. Obtenido de Revista Petroquímica: <https://www.revistapetroquimica.com/reciclado-energetico-de-plasticos-co-procesamiento-en-refinerias-y-craqueo-termico/>
- The essential Chemical Industry*. (2017). Obtenido de Polyethylene: <http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyethene.html>
- U. Santa Maria de Chile. (2016). *Fundamentos de Materiales*. Obtenido de <https://w3.ual.es/~mjgarcia/practica4.pdf>
- Universidad de Barcelona. (2009). *CM Materials*. Obtenido de <http://www.ub.edu/cmmaterials/es/content/polietileno-de-alta-densidad>
- Velandia Cabra, J. (2017). Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja. *ONTARE*, 5.

# APÉNDICES

# **Apéndice A**

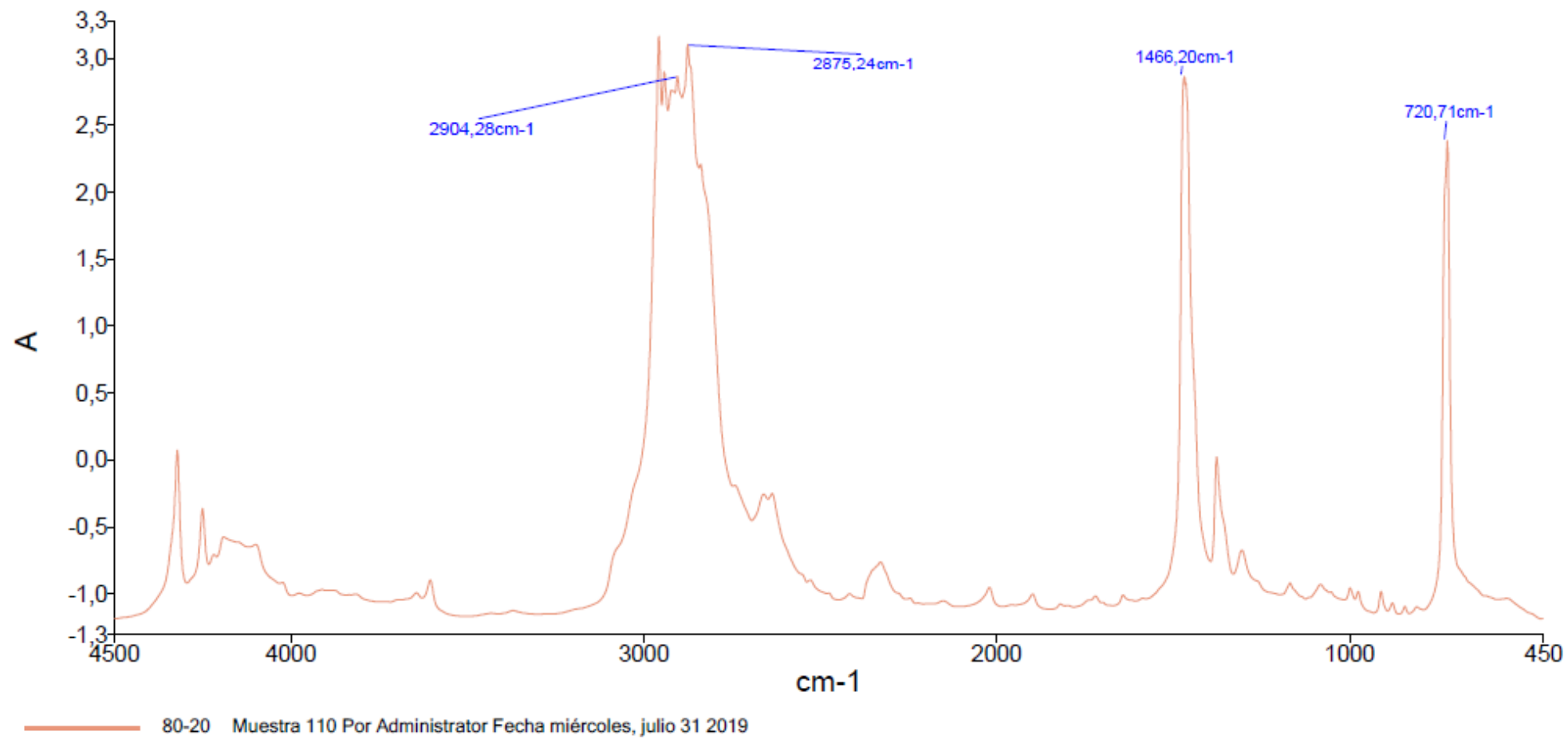
**Espectrogramas obtenidos en el ensayo FTIR**



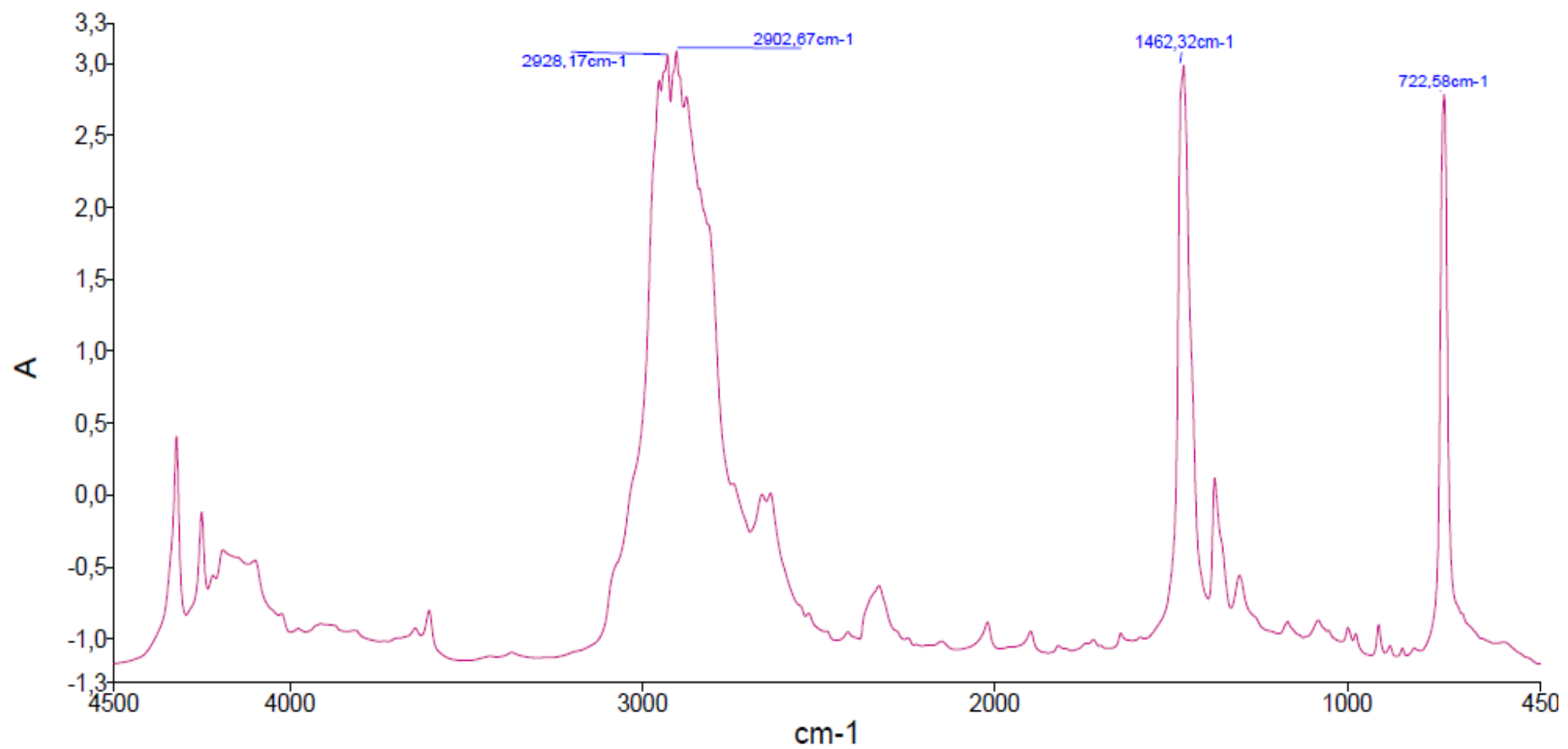


100 Muestra 108 Por Administrator Fecha miércoles, julio 31 2019

**Apéndice A.1 Espectrograma de la mezcla del 100%**

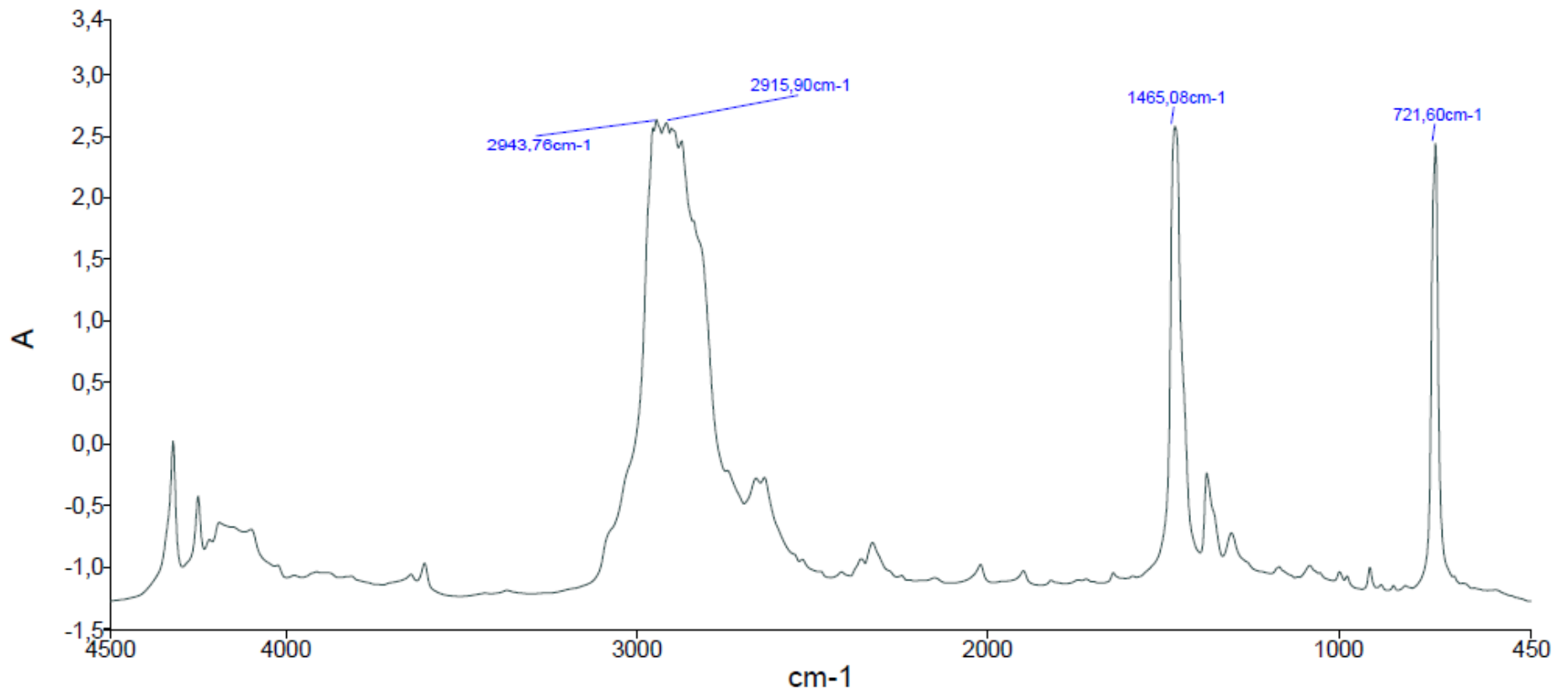


Apéndice A.2 Espectrograma de la mezcla 80-20 %



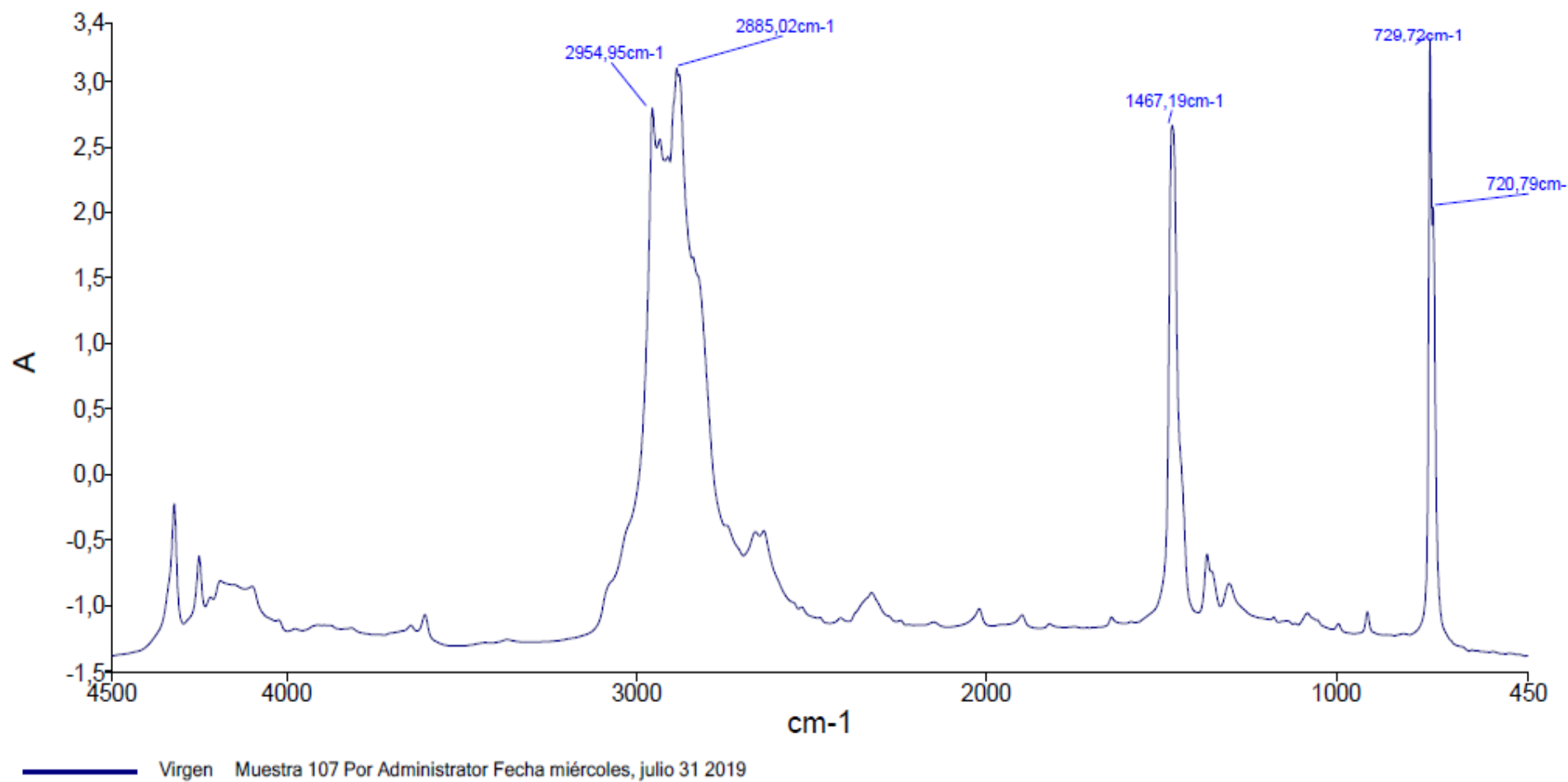
70-30 Muestra 106 Por Administrator Fecha miércoles, julio 31 2019

Apéndice A.3 Espectrograma de la mezcla 70-30 %



50-50 Muestra 105 Por Administrator Fecha miércoles, julio 31 2019

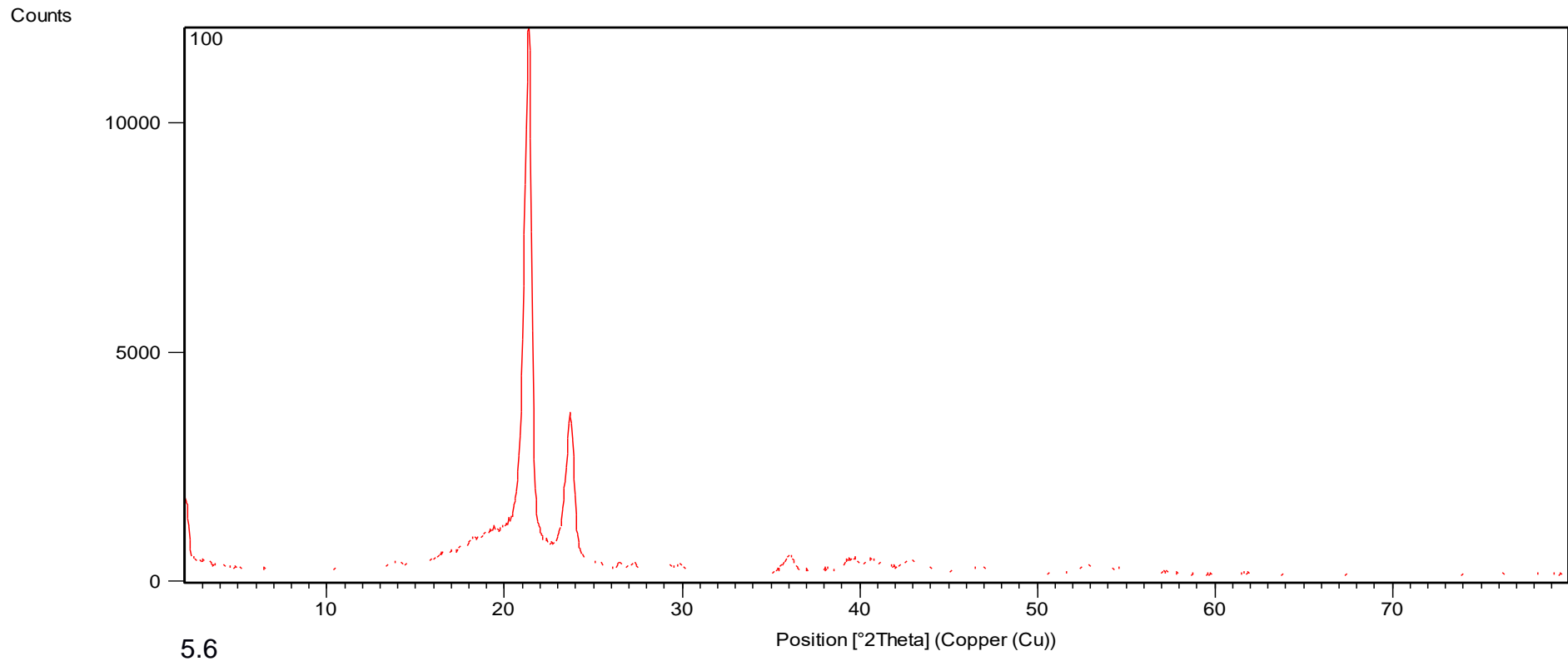
Apéndice A.4 Espectrograma obtenido de la mezcla 50-50



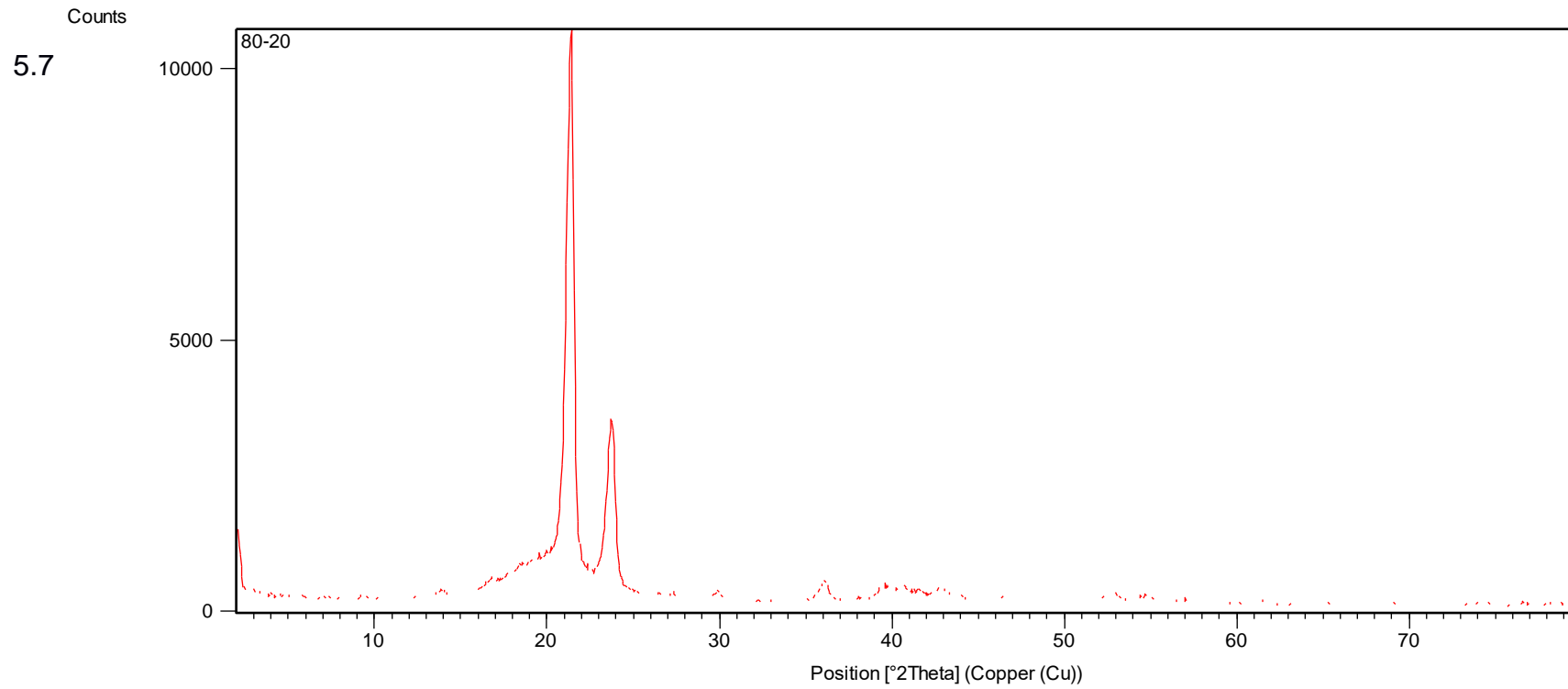
Apéndice A 5. Espectrograma Obtenido por la muestra Virgen

# **Apéndice B**

**Difractogramas obtenidos del análisis por difracción de Rayos X**

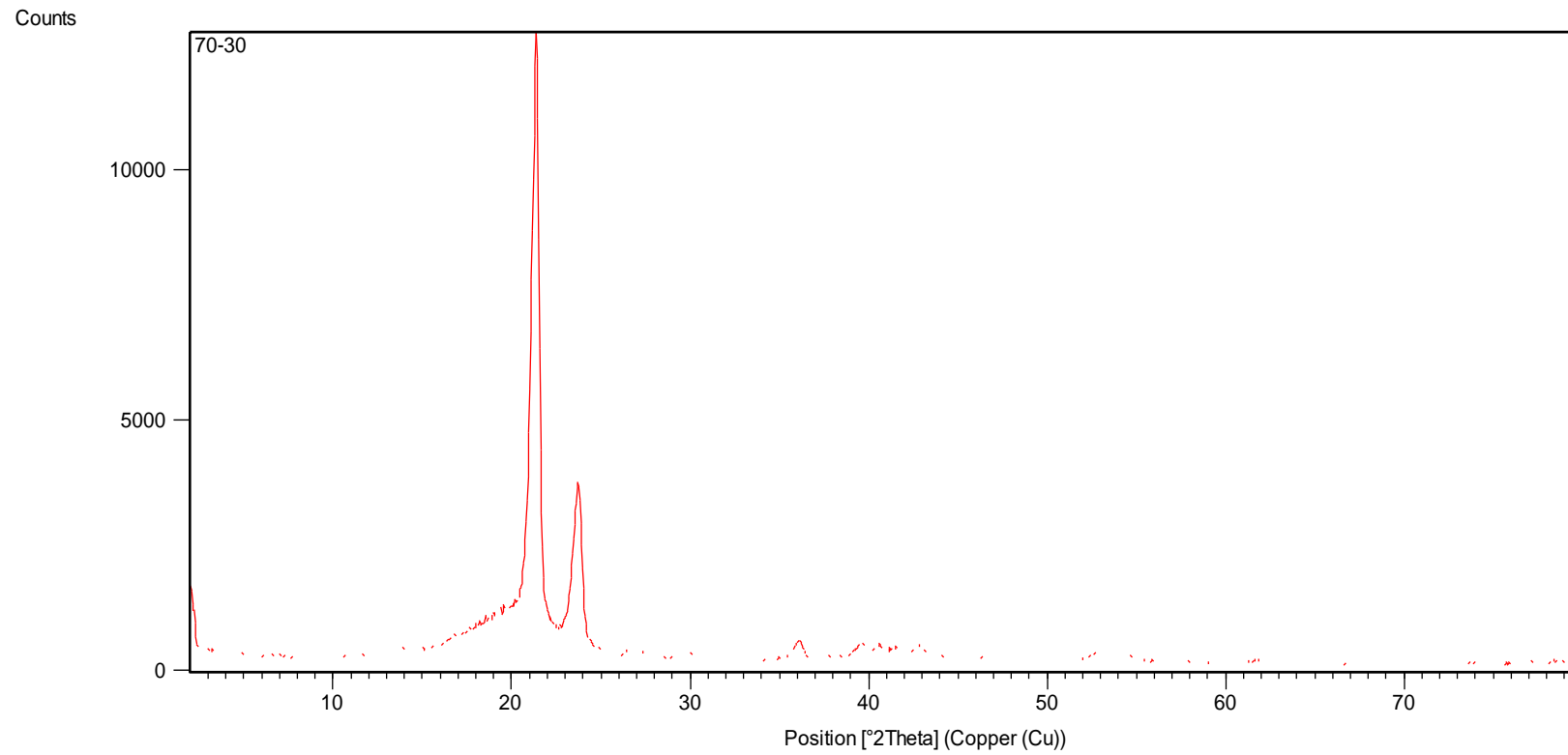


**Apéndice B.1 Difractograma de la mezcla 100%**

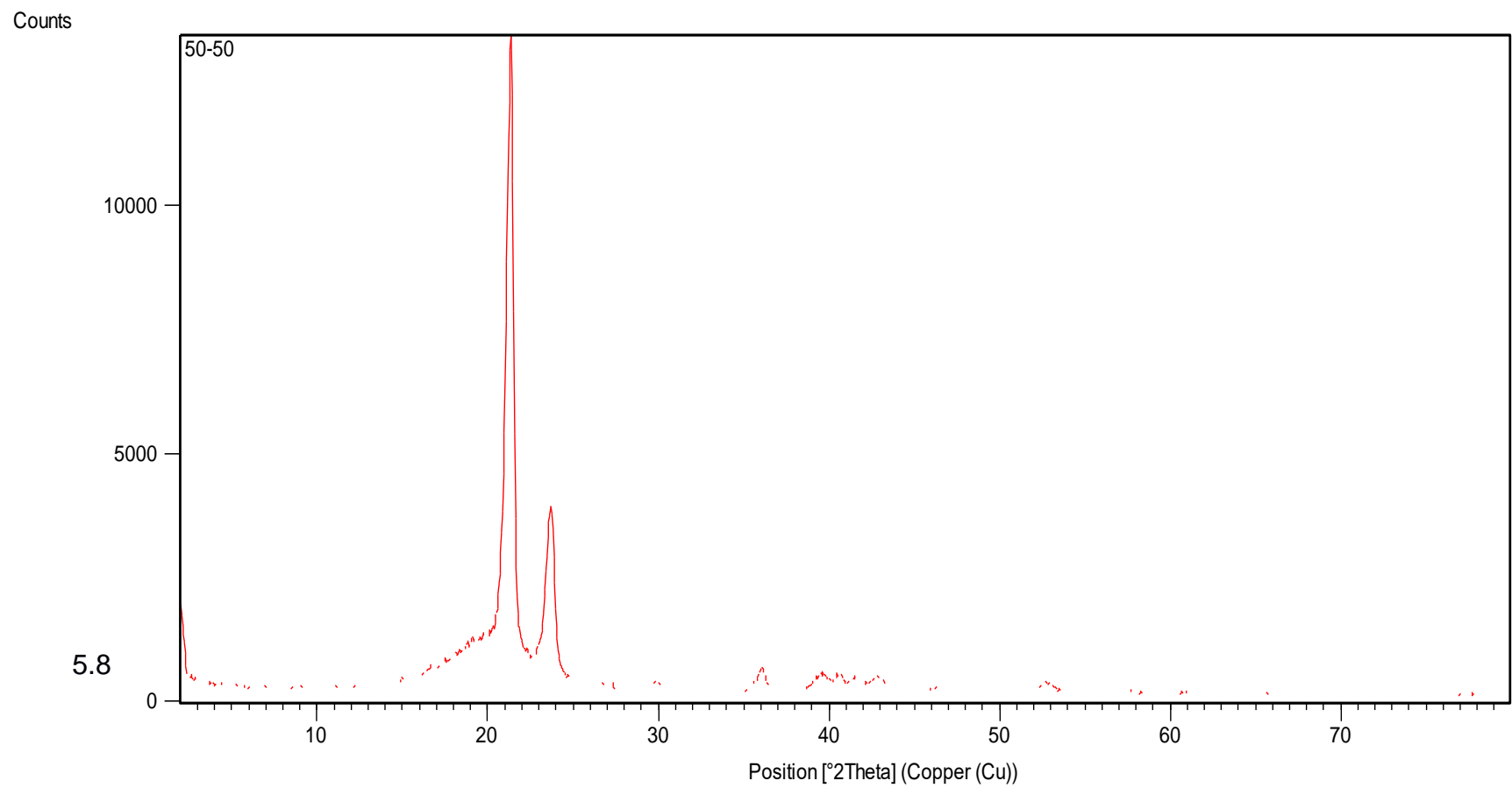


**Apéndice B.2 Difractograma de la mezcla 80-20%**

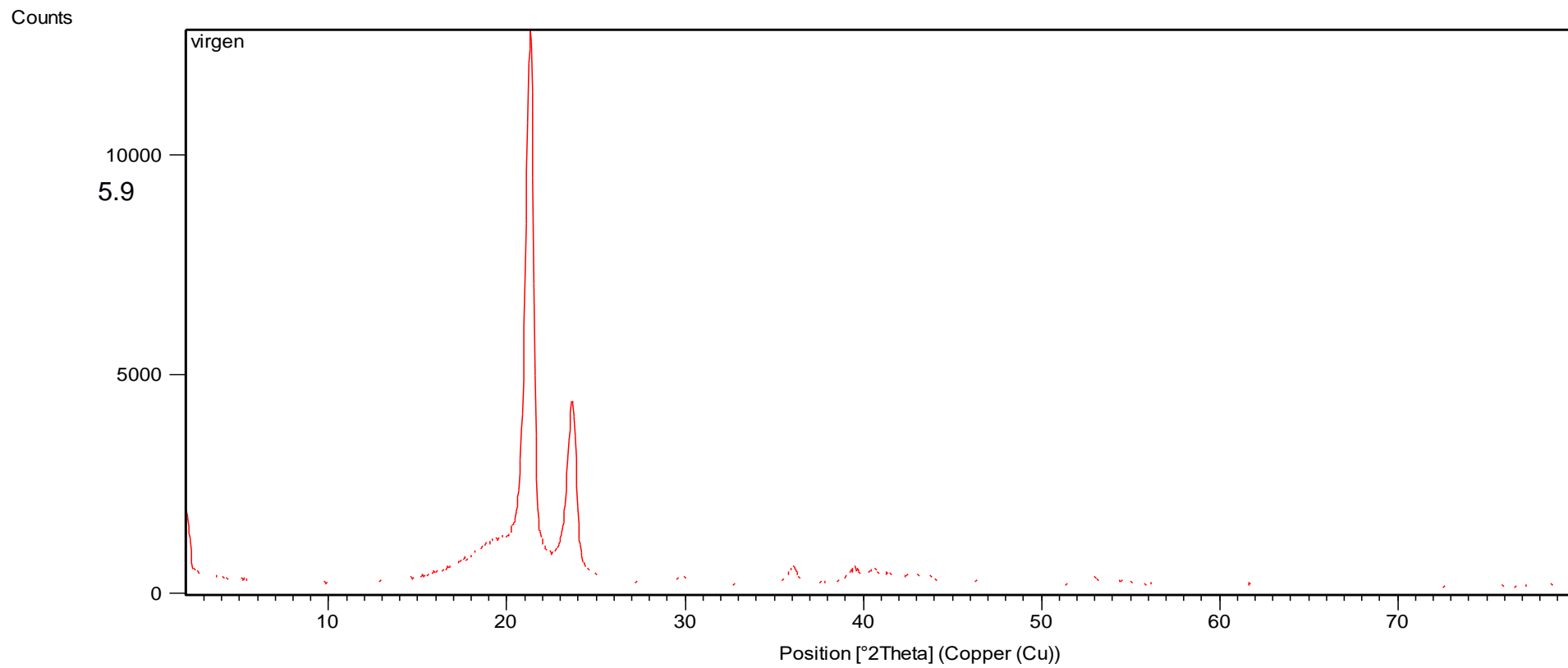




**Apéndice B.3 Difractograma de la mezcla 70-30%**



**Apéndice B.4 Difractograma de la mezcla 50-50**



**Apéndice B.5 Difractograma de la muestra Virgen**

# **Apéndice C**

## **Catálogo resinas PEAD**

Productos y Propiedades

## Blow Molding / Moldado por Soplado

Typical Properties Propiedades Típicas		Melt Flow Rate (90°C / 216 kg) Índice de Fluidéz (90°C / 216 kg)	Melt Flow Rate (90°C / 5 kg) Índice de Fluidéz (90°C / 5 kg)	Melt Flow Rate (90°C / 216 kg) Índice de Fluidéz (90°C / 216 kg)	Density Densidad	Tensile Strength at Yield <sup>a</sup> Tensión de Vaciado <sup>a</sup>	Tensile Strength at Break <sup>a</sup> Tensión de Rotura <sup>a</sup>	Flexural Modulus – 1% Secant <sup>b</sup> Módulo de Flexión secante a 1% <sup>b</sup>	Shore D Hardness <sup>c</sup> Dureza (Shore D) <sup>c</sup>	Izod Impact Strength (23°C) <sup>b</sup> Resistencia al Impacto Izod <sup>b</sup>
ASTM Method Método ASTM		D 1238	D 1238	D 1238	D 1505/ D 792	D 638	D 638	D 790	D 2240	D 256
Units / Unidades		g/10 min	g/10 min	g/10 min	g/cm <sup>3</sup>	MPa	MPa	MPa	–	J/m
HDPE / PEAD	HD7000C	0.35	-	32	0.963	30	30	1600	65	250
		Home care ethanol, liquid food and food packaging; toys. / <i>Empaque para alcohol, para alimentos</i>								
	ES6004	0.35	-	30.0	0.960	30	35	1450	65	175
		Home care ethanol packaging, liquid food packaging, food packing and pharmaceutical products p; <i>Empaque para alcohol, para alimentos líquidos, alimentos em general y productos farmacéuticos</i>								
	GF4960	0.34	-	28.0	0.961	30	30	1550	65	125
		Home care ethanol packaging, liquid food packaging, food packing and pharmaceutical products p; <i>Empaque para alcohol, para alimentos líquidos, alimentos em general y productos farmacéuticos</i>								
	BS002W	0.33	-	24.0	0.959	30	35	1450	63	200
		Cosmetic packaging and tissue and hygiene packaging. / <i>Empaque para cosméticos y productos de t</i>								
	GF4950	0.36	-	28.0	0.956	30	30	1350	66	150
		Cosmetic packaging and tissue and hygiene packaging. / <i>Empaque para cosméticos y productos de t</i>								
	HS5502	0.35	-	32.0	0.954	30	30	1350	66	150
		Cosmetic packaging, lubricating oil packaging and pharmaceutical products packaging (unrecomm <i>aceites lubricantes y productos farmacéuticos (no indicado para solución parenteral).</i>								
	HS5502XP	0.35	-	30.0	0.955	25	25	1300	65	150
		Cosmetic packaging and tissue and hygiene packaging. / <i>Empaque para cosméticos y productos de</i>								
	HS5403	0.30	-	26.0	0.954	30	35	1250	65	100
		Cosmetic packaging, tissue and hygiene packaging and lubricating oil packaging. / <i>Empaque para c</i>								
	GF4950HS	0.21	-	20.0	0.951	25	35	1100	62	150
	2 L to 20 L domestic, chemical and industrial products jerricans; agricultural sprayer; small automoc <i>químicos domésticos e industriales; pulverizadores agrícola; Reservorios automotores pequeños;</i>									
HD3400U	-	0.45	10.0	0.948	25	30	1050	64	-	
	2 L to 20 L domestic, chemical and industrial products jerricans; small automotive tanks; bedliner. / <i>Reservorios automotores pequeños; bedliner.</i>									
HS5010	-	0.38	10.0	0.948	25	35	1000	63	-	
	2 L to 20 L domestic, chemical and industrial products jerricans; bedliner. / <i>Bidones de 2 a 20 L par</i>									
HS5407	-	0.30	70	0.954	30	40	1250	65	-	
	Liquid food packaging (up to 60 L), domestic, chemical and industrial products; IBC (Intermediate l <i>(hasta 60 L), productos químicos domésticos e industriales; IBC (Itermediate Bulk Container); be</i>									
HS5407V1	-	0.30	70	0.954	30	40	1250	65	-	
	IBC (Intermediate Bulk Container).									
HS5608	-	0.30	8.5	0.955	30	35	1250	65	-	
	Liquid food packaging (up to 60 L), domestic, chemical and industrial products. / <i>Empaque de alimentos industriales.</i>									
HD9601C	-	0.18	6.0	0.955	30	35	1250	65	-	
	Liquid food packaging (20 L to 100 L), domestic, chemical and industrial products. / <i>Empaque de alimen industriales.</i>									
HS5103M	-	0.12	3.0	0.951	30	40	1200	64	-	
	Storage drums from 20 L to 200 L. / <i>Tambores de 20 a 200 L</i>									

### Apéndice C.1 Productos y propiedades de PEAD para soplado.

Fuente: Catálogo BRASKEM