

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Estudio de la vida útil de los zunchos plásticos de uso agrícola e industrial mediante análisis de correlación aplicando las técnicas FTIR, SEM y DSC.

### **PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

**Presentado por:**

Adriana Patricia Espinoza Cevallos

Nury Gabriela Mite Guzmán

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2021

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto va dedicado a mi madre quién ha sido una guía y ayuda durante este largo camino y me ha formado en la persona que soy ahora. A mis hermanas, tíos y abuelito quienes me han brindado su apoyo incondicional para alcanzar esta meta. A mis amigos por el apoyo moral que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

### **Adriana Espinoza**

Dedico el presente proyecto a mis padres y mis hermanos quienes han sido mi soporte y guía a lo largo de mi vida, también a mis amigos por su incondicional presencia, cariño y todas las enseñanzas brindadas.

### **Nury Mite**

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar nuestra gratitud a Dios por brindarnos una vida de bendiciones y aprendizajes, por llenarnos de fortaleza en los momentos de debilidad y por darnos la inteligencia para continuar este proceso de obtener uno de nuestros anhelos más deseados.

A nuestro tutor Dr. Joan Vera por impartirnos sus conocimientos a lo largo de este arduo proceso de aprendizaje.

A LEMAT por darnos la oportunidad de contribuir en este proyecto de investigación.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Adriana Espinoza Cevallos* y *Nury Mite Guzmán* 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”



Autor 1



Autor 2

# EVALUADORES

NADIA  
MAGALY  
FLORES  
MANRIQUE

Firmado digitalmente  
por NADIA MAGALY  
FLORES MANRIQUE  
Fecha: 2021.09.22  
15:29:34 -05'00'

---

**Nombre del Profesor**

PROFESOR DE LA MATERIA



Motivo: He  
revisado este  
documento  
Fecha:2021-08-  
29 16:55-05:00

---

**Nombre del Profesor**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

La presente investigación consiste en el estudio del envejecimiento artificial y natural de zunchos plásticos elaborados a base del PP y PE de composición pura y reciclados con el fin de evaluar el tiempo de vida útil y los cambios que se producen sobre sus propiedades químicas, físicas, mecánicas, y estructurales a lo largo del proceso de degradación.

En nuestro país el sector agrícola está liderado por la industria bananera, en la cual se utilizan los zunchos plásticos para el amarre o apuntalamiento de las plantas. Debido a factores como la tensión, la humedad y la exposición prolongada a la radiación UV éstos sufren degradación hasta el punto de dejar de ser útiles, esto causa una gran insatisfacción en los agricultores al no poder contar con materiales resistentes. Nuestra propuesta respondiendo a esta necesidad, trata de un estudio que permite analizar la durabilidad de dichos materiales.

Se llevaron a cabo pruebas sobre las muestras a fin de monitorear sus propiedades y se establecieron correlaciones entre las propiedades cuando son afectadas por el proceso de degradación, para ello se realizaron ensayos de resistencia mecánica a la tracción, FTIR, DSC y SEM siguiendo las normas ASTM D3950, ASTM E1252, ASTM D3417 y ASTM E986 respectivamente.

Los resultados evidenciaron que las muestras se componían de PE y PP ya sea puros o en diferente porcentaje de composición, además, se pudo observar el comportamiento de las propiedades del material frente a la degradación, donde se obtuvo que la muestra que se compone de 60% de PP puro, 40% de PP reciclado, trazas de PE y aditivo anti UV es la que mejor resistencia a la degradación presenta. Por último, a través del análisis económico se determinó que el precio de venta de dicho producto es de \$32,40, por tanto, a los agricultores les conviene adquirir zunchos plásticos con dicha composición ya que es el que mejor relación costo-beneficio presenta y el que mayor resistencia a condiciones externas posee.

**Palabras Clave:** Degradación, polímeros, zunchos, correlación.

## **ABSTRACT**

*The present study consists describes the artificial and natural aging of plastic straps made from pure and recycled PP and PE in order to evaluate the useful life and the changes that occur on their chemical, physical, mechanical, and structural properties throughout the degradation process.*

*In our country, the agricultural sector is leaded by the banana industry, in which plastic straps are used for the mooring or propping of plants. Due to factors such as stress, humidity and prolonged exposure to UV radiation these suffer degradation to the point of no longer being useful, this causes great unsatisfaction in farmers by not being able to count on resistant materials. Our proposal, responding to this need, deals with a study that allows analyzing the durability of these materials.*

*Test were performed on the samples in order to observe their properties and establish correlations between the properties when the degradation process affects them. For this purpose, tensile strength, FTIR, DSC and SEM tests were carried out following ASTM D3950, ASTM E1252, ASTM D3417 and ASTM E986 standards, respectively.*

*The results showed that the samples were composed of PE and PP, either pure or in different percentages of composition. In addition, it was possible to observe the behavior of the material properties against degradation, where it was obtained that the sample composed of 60% pure PP, 40% recycled PP, pieces of PE and anti-UV additive is the one with the best resistance to degradation.*

*Finally, through the economic analysis it was determined that the selling price of this product is \$32,40, therefore it is convenient for farmers to purchase plastic strapping with this composition since it is the one with the best cost-benefit ratio and the one with the best resistance to external conditions.*

**Keywords:** *aging, polymer, straps, correlation.*

## ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
ÍNDICE DE APENDICE .....	XI
FIGURAS DE APENDICE.....	XII
CAPÍTULO 1 .....	14
1    Introducción .....	14
1.1    Descripción del problema .....	14
1.2    Justificación del problema.....	15
1.3    Objetivos.....	16
1.3.1    Objetivo General .....	16
1.3.2    Objetivos específicos .....	16
1.4    Marco teórico .....	17
1.4.1    Generalidades de los plásticos .....	17
1.4.2    Generalidades del polipropileno.....	18
1.4.3    Generalidades del polietileno .....	19
1.4.4    Degradación de los polímeros.....	19
1.4.5    Evaluación de la degradación en materiales plásticos .....	22
1.4.6    Índice de carbonilo .....	24

1.4.7	Cristalinidad .....	24
1.4.8	Módulo de Young .....	25
1.4.9	Aditivos de protección UV .....	25
1.4.10	Plásticos en el medio agrícola.....	26
CAPÍTULO 2 .....		28
2	Metodología .....	28
2.1	Muestreo.....	28
2.2	Preparación de muestras.....	30
2.2.1	Envejecimiento natural .....	30
2.2.2	Envejecimiento artificial.....	30
2.3	Experimentación .....	31
2.3.1	Ensayo FTIR .....	31
2.3.2	Ensayo DSC.....	32
2.3.3	Ensayo SEM .....	33
2.3.4	Ensayo de tensión.....	34
CAPÍTULO 3 .....		35
3	Resultados Y ANÁLISIS.....	35
3.1	Identificación de la composición de las muestras. ....	35
3.2	Análisis de las muestras en el proceso de degradación .....	40
3.2.1	Propiedades químicas.....	40
3.2.2	Propiedades físico químicas .....	43
3.2.3	Propiedades mecánicas.....	48
3.2.4	Propiedades físicas del material.....	51
3.3	Análisis de correlaciones entre propiedades .....	53
3.4	Análisis económico .....	54
CAPÍTULO 4 .....		56

4	Conclusiones Y Recomendaciones.....	56
4.1	Conclusiones .....	56
4.2.	Recomendaciones .....	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	58
	APÉNDICES .....	62

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
LEMAT	Laboratorio de Evaluación de Materiales
LAQUINS	Laboratorio de Análisis Químico Instrumental
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
PP	Polipropileno
PE	Polietileno
PEBD	Polietileno de baja densidad
PEAD	Polietileno de alta densidad
FTIR	Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier
DSC	Calorimetría Diferencial de Barrido
SEM	Microscopía electrónica de Barrido
ATR	Reflectancia Total Atenuada
IC	Índice de carbonilo
SAUB	Área Específica Bajo la Curva

## SIMBOLOGÍA

cm <sup>-1</sup>	Longitud de Onda
mm	Milímetro
nm	Nanómetros
MPa	Mega Pascales
Kgf	Kilogramo fuerza
°C	Grado Celsius
%	Porcentaje
J/g	Entalpía
C	Carbono
O	Oxígeno
H	Hidrógeno

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Polimerización del polipropileno. ....	18
Figura 1.2 Polimerización del polietileno.....	19
Figura 1.3 Mecanismo de iniciación de las reacciones de oxidación. ....	21
Figura 1.4 Mecanismo de propagación de las reacciones de oxidación. ....	21
Figura 2.1 Clasificación de las muestras. ....	29
Figura 2.2 Clasificación de las muestras. ....	30
Figura 2.3 Ingreso de muestras a envejecimiento acelerado.....	31
Figura 2.4 Espectrofotómetro Thermo Scientific.....	32
Figura 2.5 Calorímetro TA Instruments.....	33
Figura 2.6 Microscopio electrónico de barrido. ....	33
Figura 2.7 Equipo para ensayo de tensión. ....	34
Figura 3.1 Estructura de la benzofenona. ....	36
Figura 3.2 FTIR muestra 20-5391 en t=0.....	36
Figura 3.3 FTIR teórico del PEBD.....	36
Figura 3.4 DSC muestra 20-5391 en t=0. ....	37
Figura 3.5 FTIR muestras PP en t=0. ....	38
Figura 3.6 FTIR teórico del PP.....	38
Figura 3.7 IC en muestras de degradación artificial.....	41
Figura 3.8 IC en muestras de degradación natural. ....	41
Figura 3.9 Temp. de fusión en muestras de degradación artificial.....	44
Figura 3.10 Temp. de fusión en muestras de degradación natural.....	44
Figura 3.11 Índice de cristalinidad en degradación artificial.....	46
Figura 3.12 Índice de cristalinidad en degradación natural. ....	47
Figura 3.13 Carga máxima en degradación artificial.....	48

Figura 3.14 Microfotografía de la muestra 20-5396. a) t=0 h b) t=800 h.....	52
Figura 3.15 Microfotografía de la muestra 20-5754. a) t=0 h b) t=800 h.....	52
Figura 3.16 Microfotografía de la muestra 20-5755. a) t=0 h b) t=800 h.....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Codificación de muestras de zunchos plásticos.....	29
Tabla 2.2 Condiciones de exposición de las muestras. ....	30
Tabla 3.1 Resultados composición de zunchos plásticos.....	39
Tabla 3.2 Resultados de IC. ....	40
Tabla 3.3 Resultados temperaturas de fusión. ....	43
Tabla 3.4 Resultados cristalinidad. ....	46
Tabla 3.5 Resultados carga máxima.....	48
Tabla 3.6 Resultados propiedades degradación artificial.....	50
Tabla 3.7 Resultados propiedades degradación natural.....	50
Tabla 3.8 Ponderación total de degradación. ....	50
Tabla 3.9 Costos totales de inversión. ....	54
Tabla 3.10 Flujo de caja proyectado en 6 años. ....	55
Tabla 3.11 Ganancia de venta por producto.....	55

## ÍNDICE DE APENDICE

APÉNDICE A: RESULTADOS ENSAYO DSC.....	63
APÉNDICE B: CORRELACION IC- CARGA MÁXIMA .....	66
APÉNDICE C: CORRELACIÓN IC- %CRISTALINIDAD.....	69
APÉNDICE D: CORRELACIÓN IC- T. FUSIÓN .....	72

## FIGURAS DE APENDICE

Figura A1 DSC 205391 .....	63
Figura A2 DSC 205392 .....	63
Figura A3 DSC 205393 .....	63
Figura A4 DSC 205394 .....	64
Figura A5 DSC 205395 .....	64
Figura A6 DSC 205396 .....	64
Figura A7 DSC 205754 .....	65
Figura A8 DSC 205755 .....	65
Figura A9 DSC 205756 .....	65
Figura B1 Correlación IC- carga máxima 205391 .....	66
Figura B2 Correlación IC- carga máxima 205392 .....	66
Figura B3 Correlación IC- carga máxima 205393 .....	66
Figura B4 Correlación IC- carga máxima 205394 .....	67
Figura B5 Correlación IC- carga máxima 205395 .....	67
Figura B6 Correlación IC- carga máxima 205396 .....	67
Figura B7 Correlación IC- carga máxima 205754 .....	68
Figura B8 Correlación IC- carga máxima 205755 .....	68
Figura B9 Correlación IC- carga máxima 205756 .....	68
Figura C1 Correlación IC- cristalinidad 205391 .....	69
Figura C2 Correlación IC- cristalinidad 205392 .....	69
Figura C3 Correlación IC- cristalinidad 205393 .....	69
Figura C4 Correlación IC- cristalinidad 205394 .....	70
Figura C5 Correlación IC- cristalinidad 205395 .....	70
Figura C6 Correlación IC- cristalinidad 205396 .....	70

Figura C7 Correlación IC- cristalinidad 205754 .....	71
Figura C8 Correlación IC- cristalinidad 205755 .....	71
Figura C9 Correlación IC- cristalinidad 205756 .....	71
Figura D1 Correlación IC- T. fusión 205391 .....	72
Figura D2 Correlación IC- T. fusión 205392 .....	72
Figura D3 Correlación IC- T. fusión 205393 .....	72
Figura D4 Correlación IC- T. fusión 205394 .....	73
Figura D5 Correlación IC- T. fusión 205395 .....	73
Figura D6 Correlación IC- T. fusión 205396 .....	73
Figura D7 Correlación IC- T. fusión 205754 .....	74
Figura D8 Correlación IC- T. fusión 205755 .....	74
Figura D9 Correlación IC- T. fusión 205756 .....	74

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

El consumo de plásticos ha aumentado significativamente en los últimos años y su uso se ha vuelto imprescindible por sus innumerables ventajas. Los plásticos de mayor uso en la industria son el polietileno y polipropileno y su aplicación ha incrementado debido a sus bajos costos y gran estabilidad de sus estructuras.

En la industria agrícola estos polímeros son utilizados como principal herramienta en el transporte y almacenamiento de la producción. Gran parte de este material se utiliza en forma de cintas (zunchos) para el embalaje de los productos de manera segura, sin embargo, al estar sometidos a diversas condiciones ambientales y constante tensión en el campo de aplicación, el material sufre fatiga y se deteriora, esto a su vez puede generar pérdidas del producto agrícola durante el transporte y almacenamiento.

Según el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP, Instituto Nacional de Investigación Agropecuarias., 2016) “el cultivo de banano constituye la actividad de mayor importancia para la economía del Ecuador y se cuenta con una superficie de siembra de 230000 hectáreas”. En la industria bananera los zunchos plásticos tienen un rol importante pues se utilizan para el amarre o apuntalamiento de las plantas, por ello los fabricantes de zunchos plásticos constantemente se encuentran en la búsqueda de alternativas para mejorar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de sus productos, ya que sus clientes requieren que estos sean más resistentes y así tengan un mayor tiempo de vida útil.

En términos generales, el tiempo de vida útil de un producto plástico es muy corto en comparación con su tiempo de degradación total, y una vez que deja de ser útil es desechado, permaneciendo como desperdicio en el ecosistema. Según la

Fundación Aquae (2019) el tiempo en que un polímero demora en degradarse varía entre los 100 y 1000 años mientras que su tiempo de utilidad puede ser incluso de segundos.

La búsqueda de alternativas para obtener zunchos plásticos de mejores características se vuelve entonces más urgente, pues, al garantizar un mayor tiempo de vida útil se asegura una menor generación de desperdicios, además la satisfacción los agricultores de contar con un producto adecuado para sus necesidades en la industria o en el medio agrícola.

## **1.2 Justificación del problema**

En el medio agrícola el polipropileno y el polietileno tienen un amplio uso en forma de zunchos para el embalaje, almacenamiento y transporte de cajas o productos. En nuestro país el sector agrícola está liderado por la industria bananera, en la cual se utilizan los zunchos plásticos especialmente para el amarre o apuntalamiento de las plantas.

Debido a los factores físicos y naturales a los que son sometidos estos materiales como: tensión, humedad y exposición prolongada de radiación UV, estos se degradan hasta tal punto que ya no son útiles y deben ser desechados generando desperdicios que tardan al menos un centenar de años en descomponerse por completo, además causa una gran insatisfacción en los agricultores al no poder contar con un material resistente acorde a sus necesidades. En este sentido los fabricantes de zunchos plásticos se encuentran con el desafío de desarrollar productos de mejores propiedades para así poder alargar su tiempo de vida útil.

Se conoce que en el mercado existen dos tipos de zunchos, unos elaborados de plástico y otros elaborados de acero inoxidable. Los zunchos de acero se utilizan normalmente para fijaciones permanentes de objetos al exterior como postes, cañerías o tubos, mientras que los zunchos plásticos se utilizan para el embalaje y transporte de amarres temporales (Gotex Chile, 2019).

Los zunchos plásticos están elaborados a partir de diferentes tipos de polímeros, los más comunes son de Polietileno (PE) y de Polipropileno (PP), los más utilizados son los de Polipropileno puesto que se trata de uno de los polímeros de mayor producción a nivel mundial debido a la simplicidad de su estructura, además es económico y gracias a sus propiedades físicas y químicas es un material versátil para diferentes aplicaciones.

En el presente proyecto se pretende realizar un estudio del tiempo de vida útil de muestras de zunchos plásticos de Polipropileno mediante técnicas químicas como FTIR, SEM Y DSC, pues este tipo de estudios permiten analizar la degradación del material a nivel estructural lo que a su vez contribuye para el desarrollo de materiales más resistentes y aditivos de mejores características con el fin de mejorar el rendimiento de los mismos.

La novedad del presente proyecto no se encuentra en la metodología de los ensayos propuestos, puesto que estos han sido ampliamente utilizados en investigaciones y estudios similares, el presente estudio busca responder la necesidad del sector agrícola ecuatoriano, especialmente del sector bananero que requiere un estudio que demuestre cuál es la formulación idónea que garantice una mayor resistencia ante la degradación.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluar el tiempo de vida útil de los zunchos por medio de técnicas FTIR, DSC, SEM y ensayos mecánicos cuando son sometidos a envejecimiento artificial y natural.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Realizar caracterizaciones fisicoquímicas, por medio de las técnicas FTIR y DSC para la identificación de la composición de los zunchos plásticos.

- Estudiar el efecto causado sobre el material plástico cuando se somete a degradación por medio de los ensayos físicos, químicos y mecánicos para el análisis de los cambios a nivel molecular y superficial de las muestras.
- Establecer las variables que se relacionan entre sí por medio de análisis de correlaciones de las propiedades.
- Identificar la muestra que menor degradación presente por medio de los análisis realizados, para la determinación de la composición de la muestra que presente mayor resistencia en el medio agrícola.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Generalidades de los plásticos**

Los plásticos son compuestos orgánicos formados por la fusión de miles de átomos hasta lograr formar una molécula de gran tamaño, se componen principalmente de carbono, hidrógeno y oxígeno. Por lo general se sintetizan a partir de compuestos de bajo peso molecular, modificación química de materiales naturales (en general la celulosa) o a partir de compuestos orgánicos (Cristán et al., 2003).

La producción de plásticos tiene un efecto sobre el desarrollo económico en una sociedad puesto que, una persona promedio en toda su vida ha usado una variedad de productos plásticos de manera cotidiana ya sea para consumo personal (ropa, artículos de oficina, utensilios de cocina entre otros) o en cualquier otra actividad productiva como almacenamiento, transporte, construcciones, etc.

Un artículo publicado en la revista "Plastics the Facts" reveló que en el año 2019 la producción de plásticos alcanzó un máximo de 368 millones de toneladas, de las cuales Asia lidera con un 51%, Europa con el 16%, América del Norte 19% y América Latina representa un 4% del total (Plastics Europe, 2019).

En un artículo publicado por la revista Líderes, la presidenta de la Federación de Cámaras Industriales del Ecuador, Caterina Costa, expresó lo siguiente:

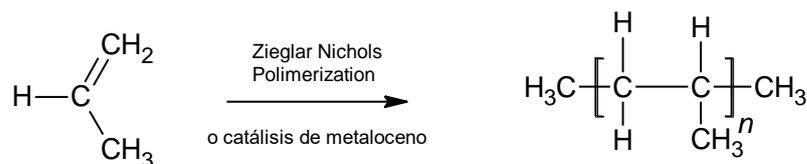
Se estima que en Ecuador en un año se producen aproximadamente 500000 toneladas de plástico y una persona promedio consume alrededor de 20 kg, además la industria del plástico se encuentra en auge ya que provee a sectores importantes como el automotriz, comercial, agrícola y bananero. Cada vez es más necesaria su aplicación en otros campos como la medicina, ciencia, transporte y energías renovables (Hoyos & Costa, 2018).

Aunque en la actualidad se intenta reducir el consumo de estos productos a base de Polipropileno debido a su impacto ambiental, el plástico es esencial en el desarrollo sostenible de la sociedad (Arandes et al., 2004).

#### 1.4.2 Generalidades del polipropileno

El polipropileno (PP) es un material que se encuentra dentro del grupo de las poliolefinas. Se caracteriza por tener apariencia cristalina y poseer propiedades termoplásticas, esto significa que a temperaturas elevadas se vuelve líquido lo que permite cambiar su forma inicial para posterior a esto endurecerse cuando el material se ha enfriado. (Caicedo et al., 2017).

La síntesis del PP se inicia con el monómero del propileno, a través de una polimerización catalítica. La polimerización es una reacción característica de los polímeros que consiste en la unión de moléculas del monómero base hasta formar una cadena más larga llamada polímero. El polipropileno resulta de la unión de miles de moléculas del monómero propileno, ésta es una reacción lineal en la que un grupo metilo se coloca sobre carbonos alternos (L.G. Wade, 2012).

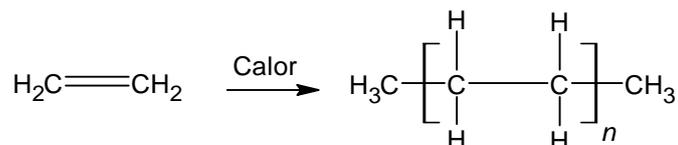


**Figura 1.1 Polimerización del polipropileno.**

[Elaborado en ChemSketch]

### 1.4.3 Generalidades del polietileno

El PE es considerado como uno de los plásticos que más se produce a nivel mundial, el uso de este material reside en sus propiedades intrínsecas y su potencial aplicación en productos que se usan a diario. El polietileno es un polímero sintético de uso común que se obtiene a través de la polimerización del etileno tal como se muestra en la siguiente ilustración (Roca, 2005):



**Figura 1.2 Polimerización del polietileno.**

[Elaborado en Chemskech]

Debido a las propiedades fisicoquímicas de este material como la densidad variable que posee, se lo puede encontrar principalmente en dos tipos de polietileno cuyas características cambian de acuerdo a su densidad y dureza.

**Polietileno de baja densidad:** es un polímero rígido, resistente que se emplea en la elaboración de envases plásticos desechables.

**Polietileno de alta densidad:** es considerado un polímero más flexible que el polietileno de alta densidad; aunque a nivel estructural son iguales, se diferencian en su sinterización debido a que un PEAD se puede sintetizar por medio de un catalizador de Ziegler-Natta mientras que un PEBD se sintetiza por medio de la polimerización de radicales libres (L.G. Wade, 2012).

### 1.4.4 Degradación de los polímeros

Se entiende como degradación al fenómeno físico químico que experimentan los polímeros, en el cual según (González, 2006) “Existe una pérdida de la estructura molecular a través de reacciones químicas que dan lugar a la ruptura de enlaces primarios de la estructura polimérica”. Cuando los polímeros se exponen continuamente a componentes oxidativos se produce un rompimiento de su cadena, generándose radicales libres y una degradación a nivel estructural del material tanto física como química, en consecuencia, se produce la degradación

del material y se presentan fisuras, micro grietas y una aglomeración de grupos hidroxilos y carbonilos en la parte superficial del material, además se producen afectaciones en las características térmicas tales como disminución en su temperatura de fusión o en la transición vítrea y cambios en las propiedades mecánicas (Costello et al., 2007).

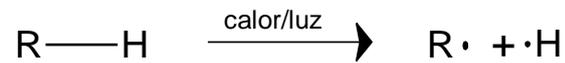
Los polímeros sufren distintos tipos de degradación cuando interactúan con el entorno, pues se encuentran expuestos a diferentes agentes como: fuerzas mecánicas, humedad, radiación, microorganismos y especies químicas. Esta interacción genera cambios en las propiedades del material, volviéndolo más frágil y quebradizo. De acuerdo al factor o agente responsable de la degradación, se puede clasificar en: degradación mecánica, termo descomposición, oxidación, hidrólisis y biodegradación. La degradación mecánica es consecuencia de la aplicación de fuerzas externas de tensión, torsión, elongación a las que puede ser sometido el material durante su vida útil, esto tiene como efecto macroscópico el desgaste, la deformación y la fractura del mismo, y a nivel molecular se evidencia en las rupturas de los enlaces primarios. (San Andrés et al., 2010)

La termo descomposición puede generarse cuando un material plástico es sometido a elevadas temperaturas, puede suceder en presencia de oxígeno (termo oxidación) o en ausencia de este (pirólisis). Cuando las temperaturas son muy elevadas la energía se aproxima a la energía del enlace carbono - carbono produciéndose la ruptura del enlace. El polipropileno experimenta este tipo de degradación cuando se somete a temperaturas superiores a 400°C, no obstante, en la intemperie no la experimenta (López, 2012)

La oxidación se genera cuando los gases atmosféricos como el oxígeno y el ozono, en combinación con la temperatura y la luz son los principales causantes del deterioro. La oxidación más común en polímeros es la denominada fotooxidación, que es iniciada por la radiación UV y actúa en conjunto con el oxígeno, cuando sólo actúa la radiación UV se denomina fotodegradación. El

mecanismo de reacción de la fotooxidación inicia con la formación de un radical en la cadena del polímero (San Andrés et al., 2010).

Iniciación:

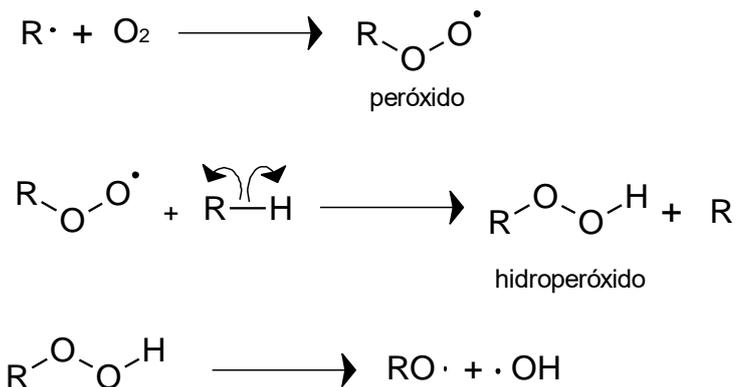


**Figura 1.3 Mecanismo de iniciación de las reacciones de oxidación.**

[Elaborado en ChemSketch]

Los radicales libres reaccionan con el oxígeno y experimentan sucesivas oxidaciones formando hidróxidos e hidroperóxidos inestables.

Propagación:



**Figura 1.4 Mecanismo de propagación de las reacciones de oxidación.**

[Elaborado en ChemSketch]

Finalmente, las especies químicas reaccionan entre sí y forman productos más estables.

La hidrólisis es una reacción química generada en un medio acuoso cuando es catalizada por ácidos o bases fuertes, para que se lleve a cabo este tipo de degradación es necesario que el polímero lleve en su estructura algún grupo hidrolizable como, por ejemplo, acetales, amidas, carbonatos, ésteres y uretanos (González, 2006).

La biodegradación se genera por acción de microorganismos vivos como hongos, bacterias y actinomicetos que atacan la estructura de los polímeros causando la ruptura de los enlaces de la cadena principal. Los materiales poliméricos sintéticos no suelen ser susceptibles a la acción de los microorganismos, sin embargo, debido a la presencia de aditivos los agentes biológicos pueden atacar en puntos terminales (Posada, 2012).

#### **1.4.5 Evaluación de la degradación en materiales plásticos**

Los polímeros sintéticos como el Polipropileno se degradan lentamente mediante el mecanismo de fotodegradación cuando son expuestos a la intemperie. Para evaluar los cambios estructurales y morfológicos que sufre el material se emplean diversas técnicas como: cromatografía por permeación de gel (GPC), para el control del peso molecular; calorimetría diferencial de barrido (DSC), para analizar cambios en la cristalinidad; espectroscopía Infrarroja (IR) o espectroscopía de resonancia magnética (RMN), para analizar los cambios en los grupos funcionales específicos como los carbonilos. (Booma et al., 2004).

La fotodegradación se evalúa midiendo alguna propiedad física o química en función del tiempo, se puede someter el material a envejecimiento natural exponiéndolo en un lugar representativo, o se puede someter a envejecimiento artificial en cámaras de radiación UV, en donde el proceso es acelerado (López, 2012)

En la norma D5208 de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials, 2015) se establece un método que permite evaluar la degradación de un material plástico mediante un ensayo acelerado con lámparas especiales de radiación ultravioleta para simular la exposición a la radiación natural del sol. El procedimiento de este ensayo consiste en evaluar a intervalos constantes de exposición las propiedades mecánicas; mediante la determinación de la elongación y tensión de rotura, las propiedades químicas; mediante la medición del índice de carbonilo, y las propiedades físicas.

Se considera que el estudio de los procesos de envejecimiento del Polipropileno es de gran importancia para el desarrollo de materiales más resistentes que los ya existentes en el mercado, además estos análisis sirven para prever el límite de su uso (Tavares et al., 2003).

A continuación, se describen tres de las técnicas usadas en la caracterización de polímeros y que van a ser tratadas dentro de este estudio: Una de las técnicas más importantes es la Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR), esta es una técnica espectroscópica que utiliza la radiación infrarroja para producir un haz de luz que bombardea la muestra, parte de la radiación la absorbe y otra parte se transmite. El espectro de luz absorbida representa una “huella” de la estructura molecular de la muestra. La funcionalidad de la espectroscopia de infrarrojos surge porque las diferentes estructuras químicas producen diferentes huellas espectrales. El resultado de esta técnica es un espectro infrarrojo, el cual se trata de un Figura XY cuya ordenada es la transmitancia o la absorbancia que se expresa en %, y cuya abscisa es el número de onda en  $\text{cm}^{-1}$ , cada pico del espectro representa una vibración específica para cada grupo funcional. (Tavares et al., 2003)

Otra de las técnicas es la calorimetría de barrido diferencial (DSC) la cual permite determinar la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia, es usada para el análisis térmico que evalúa el efecto de la temperatura sobre la variación de la capacidad calorífica de un material específico. El análisis se lleva a cabo tomando una muestra del material en interés sometiéndola a calor o frío para luego analizar los cambios producidos en su capacidad calorífica a medida que se varía el flujo de calor (Suriñach et al., 2012).

Por último, contamos con la microscopía electrónica de barrido (SEM) en la cual se utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. Es una de las técnicas más utilizadas para la visualización de superficies de materiales pues tiene una gran profundidad de campo, la cual permite que se enfoque una gran parte de la muestra a la vez que produce imágenes de alta

resolución. El equipo cuenta con un filamento que genera un haz de electrones para iluminar la muestra, con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie para crear una imagen que refleja las características de la misma, como las formas, texturas y composición química de sus constituyentes (Zhou et al., 2006)

#### 1.4.6 Índice de carbonilo

El carbonilo es un grupo funcional compuesto por un átomo de carbono enlazado mediante un doble enlace a un átomo de oxígeno. En un espectro IR el estiramiento característico del grupo funcional carbonilo se encuentra en un número de onda alrededor de 1700 y 1750  $\text{cm}^{-1}$ . El índice de carbonilo es un parámetro utilizado como un indicador de la degradación, pues es útil para controlar la banda de absorción de las especies que producen oxidación durante los procesos de foto o termo oxidación en los materiales (Mondragón, 2017).

Existen varios métodos para calcular el valor del IC, en el presente proyecto se utilizó el método de SAUB (Specific Area Under Band), el cual según (Almond et al., 2020) se considera como el método más eficaz pues permite una mayor cobertura de la banda del carbonilo y presenta mayor sensibilidad en las primeras etapas de envejecimiento. Con este método el valor del IC se calcula por medio de una relación entre la absorbancia de la banda integrada del pico del carbonilo de 1850 a 1650  $\text{cm}^{-1}$  y la del pico del metileno ( $\text{CH}_2$ ) para el caso del PP o de enlaces C-H para el caso del PE que se encuentran en el rango de 1500 a 1420  $\text{cm}^{-1}$ . La ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$CI = \frac{\text{Área bajo la banda } 1850-1650 \text{ cm}^{-1}}{\text{Área bajo la banda } 1500-1420 \text{ cm}^{-1}} \quad (1.1)$$

#### 1.4.7 Cristalinidad

La cristalinidad hace referencia a la cantidad de regiones estructuralmente ordenadas que contiene un polímero. Desde el punto de vista macromolecular la foto oxidación conduce a un aumento de la cristalinidad y a una disminución de la

masa molar, esto induce finalmente en la disminución del espacio interlamelar, responsable de la fragilidad de la estructura (Rouillon et al., 2016), además se considera que el bajo peso molecular y los grados altos de cristalinidad favorecen la fractura frágil, lo cual se evidencia en la aparición de grietas (Michler & Baltá, 2005).

Para determinar el grado de cristalización se establece una relación entre la entalpía de fusión medida y la entalpía de fusión para el material 100% cristalino:

$$k = \frac{\Delta H_{medido}}{\Delta H_{100\%C}} \quad (1.2)$$

Los valores de entalpía de fusión para los materiales 100% cristalinos son de 293 J/g para el PE y 207J/g para el PP (Netzsch, 2014).

#### 1.4.8 Módulo de Young

El módulo de Young es una medida de la rigidez de un material elástico, se puede definir como la relación entre la tensión y la deformación, es una propiedad del material muy importante debido a su influencia en las deformaciones del material bajo carga y, por tanto, en el desplazamiento de la estructura (Pavlik et al., 2019).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad (1.3)$$

Donde:

$E$ = Módulo de elasticidad longitudinal (Pa)

$\sigma$ = Tensión ejercida sobre el área de la sección transversal del elemento (Tensión=esfuerzo/área).

$\varepsilon$ = Deformación unitaria expresada como la relación entre el cambio de longitud con respecto a la longitud inicial

#### 1.4.9 Aditivos de protección UV

Los polímeros reciclados se los puede usar en variedad de aplicaciones, no obstante, la degradación de sus propiedades térmicas y mecánicas durante un

proceso térmico repetido limita su uso en diferentes aplicaciones industriales. Estudios evidencian que las etapas de procesamiento térmico de un polímero reciclado pueden generar una degradación termo-oxidativa irreparable, rompiendo sus cadenas, eliminando sustituyentes o formando dobles enlaces generando materiales reciclados con características diferentes al original (AlMaaded et al., 2013).

Con el fin de mitigar el proceso de degradación de los materiales poliméricos, expertos en el área han realizado investigaciones acerca de “mezclas de componentes” que se pueden emplear en el polímero denominados aditivos. Los aditivos protegen el material polimérico al mismo tiempo que permiten mantener las propiedades originales del mismo. (Jobin et al., 2014).

La radiación UV es uno de los principales iniciadores de la fotooxidación en los polímeros y con el fin evitar los efectos que conlleva, se añaden al material diferentes aditivos que absorben la luz UV. Entre los aditivos más utilizados están los compuestos aromáticos policíclicos, haluros de nitrógeno, disulfuros orgánicos, complejos de hierro, cromóforos con nitrógeno y tintes (Booma et al., 2004).

En la actualidad se han realizado varios estudios que propongan la introducción de grupos funcionales sobre el polipropileno implantando un copolímero, con el fin de que mejore la interacción entre otros polímeros. Una de las alternativas usadas para mejorar la resistencia al impacto en los termoplásticos rígidos como el polipropileno es la copolimerización con otro monómero como el vinilo o agregando un polímero gomoso deforme que tiene como característica mejorar la dispersión rápida de la energía antes que se genere una grieta en su estructura (Jobin et al., 2014).

#### **1.4.10 Plásticos en el medio agrícola**

En el sector agrícola el plástico es ampliamente utilizado para el transporte y almacenamiento de los productos. Ecuador siendo un país productor de banano

utiliza una amplia variedad de materiales plásticos en las bananeras, siendo estos de gran aporte para proteger y conservar la fruta. Uno de los materiales indispensables en el sector agrícola son los zunchos plásticos, que son cintas, generalmente hechas a base de Polipropileno, de diferente grosor y espesor que tienen como objetivo amarrar o sostener objetos, fijar o embalar empaques (Benavides, 2015).

Los zunchos plásticos están sujetos a degradación en su estructura física y molecular debido a las condiciones ambientales, físicas, químicas y biológicas a las que se ven expuestos como la radiación UV, la humedad, la tensión, las diferentes composiciones del material, exposición a agentes químicos, microorganismos descomponedores, etc. (Posada, 2012).

# CAPÍTULO 2

## 2 METODOLOGÍA

En base a la necesidad de la industria agrícola ecuatoriana de contar con productos que cuenten con una mayor resistencia a la degradación, causada por la exposición prolongada en la intemperie, se realizó un estudio del tiempo de vida útil de los zunchos plásticos mediante correlaciones entre las diferentes composiciones de las muestras y su resistencia a la degradación a través de análisis químicos y mecánicos, aplicando técnicas de FTIR, SEM Y DSC, puesto que, se trata de un producto ampliamente utilizado en el sector bananero, considerado como principal fuente de desarrollo económico para el país.

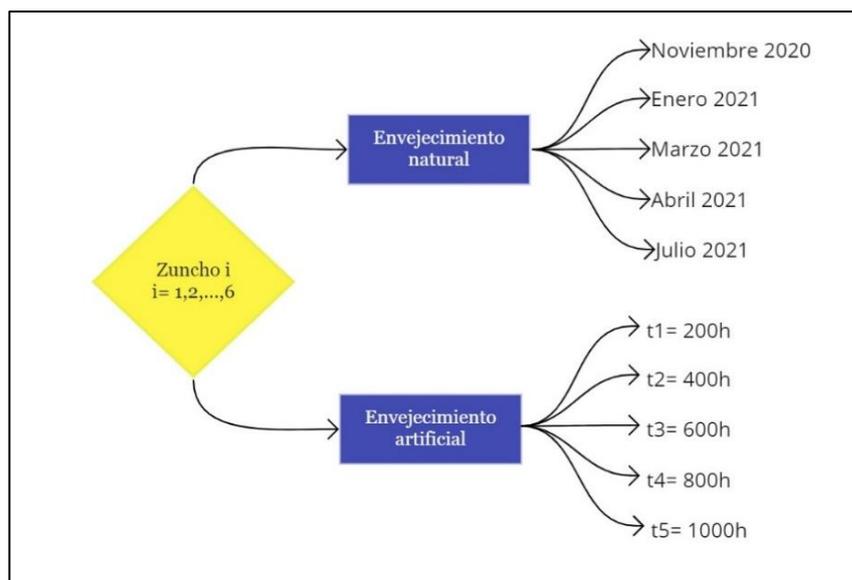
El enfoque de este proyecto fue de orden cuantitativo mediante un diseño factorial de 9x2, pues se cuenta con 9 tipos de zunchos y dos tipos de exposición para las muestras; artificial y natural. Se utilizó un método experimental. Las muestras utilizadas para este estudio fueron proporcionadas por el Laboratorio de Evaluación de Materiales (LEMAT) en donde se está llevando a cabo una investigación sobre el tiempo de vida útil de los zunchos plásticos mediante ensayos mecánicos.

### 2.1 Muestreo

Inicialmente se contaba con un total de 9 tipos de zunchos, cada uno con composición química diferente, lo cual se detalla en la tabla 2.1. La codificación de los zunchos fue proporcionada por LEMAT. Para la clasificación se tomó en consideración que cada uno de ellos debía ser expuesto tanto a radiación natural como a radiación artificial. La exposición natural comprendió un periodo de 6 meses: agosto y noviembre del 2020, enero, marzo, abril y julio del 2021. La exposición artificial comprendió un periodo 1000 horas, y se establecieron 6 tiempos: 0, 200,400,600,800 y 1000 horas. Se contó con un total de 84 muestras para analizar puesto que 6 tipos de zunchos se sometieron a ambos tipos de degradación y 3 de ellos solamente a degradación artificial.

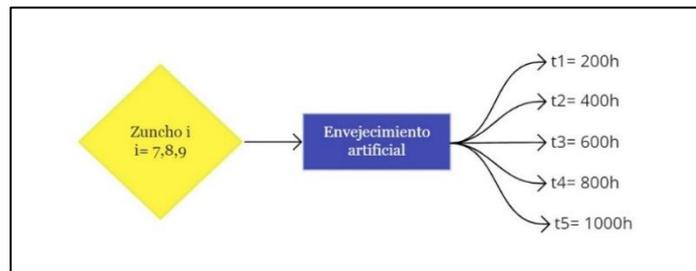
**Tabla 2.1 Codificación de muestras de zunchos plásticos.**

N°	Muestra	Código	Composición
1	Amarillo liso C	205391	Probable 100% PP virgen, No se conoce si lleva aditivo
2	Negro liso P	205392	Probable 100% PP virgen, No se conoce si lleva aditivo
3	Verde liso B	205393	Probable mixto 60% PP virgen + 40% PP reciclado No se conoce si lleva aditivo
4	Negro labrado R	205394	100% PP reciclado Con aditivo anti UV
5	Negro labrado M	205395	Mixto 75% PP virgen + 25% PP reciclado Con aditivo anti UV
6	Blanco labrado V	205396	100% PP virgen alta tensión Sin aditivo anti UV
7	Blanco labrado L	205754	100% PP virgen Con aditivo anti UV
8	Azul labrado Z	205755	100% PP virgen Con aditivo anti UV
9	Azul labrado mixto E	205756	Mixto 75% PP virgen + 25% PP reciclado Con aditivo anti UV



**Figura 2.1 Clasificación de las muestras.**

[Elaboración propia]



**Figura 2.2 Clasificación de las muestras.**

[Elaboración propia]

## 2.2 Preparación de muestras

### 2.2.1 Envejecimiento natural

La experimentación inició con la exposición de las muestras al ambiente para poder simular las condiciones reales a las que se ven expuestos los zunchos plásticos en el medio agrícola. Para ello se colocaron las muestras en la parte exterior de las instalaciones de LEMAT durante el tiempo establecido de 5 meses.

### 2.2.2 Envejecimiento artificial

Para realizar el proceso de degradación acelerada o de envejecimiento artificial se utilizó como fuente de radiación cámaras con lámparas de Xenon, marca Q-LAB, modelo Q-SUN Xe-3-HBS. Este procedimiento se realizó tomando como referencia la norma ASTM G155-13 con filtro natural, irradiación de 0,35 W/m<sup>2</sup>.nm y una longitud de onda de 340 nm. Las muestras fueron sometidas a una exposición en un ciclo de 200, 400, 600, 800 y 1000 horas para cada tipo de zuncho plástico.

**Tabla 2.2 Condiciones de exposición de las muestras.**

Parámetros	Envejecimiento natural	Envejecimiento artificial
Temperatura	21°C - 30°C	63°C
Fuente de luz	Luz solar	Filtro de luz natural
Duración	8 meses	1000 horas

Inspecciones visuales y retiro de muestras	Cada mes	Cada 200 horas
Condiciones del ensayo	Ambientales no controladas	Luz con rocío de agua



**Figura 2.3 Ingreso de muestras a envejecimiento acelerado.**

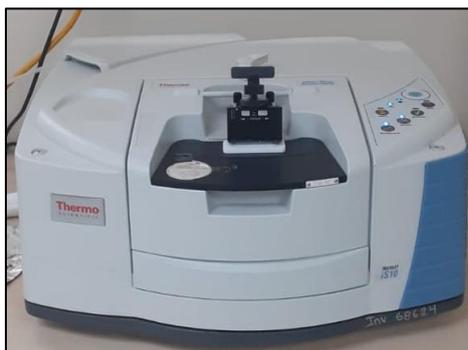
[LEMAT ESPOL]

## **2.3 Experimentación**

En esta etapa se realizaron los análisis químicos mediante las técnicas FTIR, DSC y SEM los cuales permitieron observar los patrones de modificación molecular que existían en las muestras, además se llevaron a cabo ensayos mecánicos de tensión los cuales nos permitieron estudiar el alargamiento del material a distintas cargas, ayudándonos a estudiar el tiempo de vida útil de las muestras.

### **2.3.1 Ensayo FTIR**

Los ensayos de espectroscopía infrarroja se llevaron a cabo en el equipo Thermo Scientific Nicolet iS10, siguiendo la norma ASTM E1252. Los ensayos se llevaron a cabo en un rango espectral de 500-4000  $\text{cm}^{-1}$ . Para cada muestra se realizaron 60 escaneos y se aplicó la técnica de corrección de reflectancia total atenuada (ATR) que es una herramienta que permite resaltar las modificaciones químicas inducidas por la degradación UV.



**Figura 2.4 Espectrofotómetro Thermo Scientific.**

[LAQUINS-ESPOL]

En el ensayo FTIR se obtuvieron coordenadas (X,Y) correspondientes al número de onda en  $\text{cm}^{-1}$  y al % Absorbancia respectivamente, con dichas coordenadas se procedió a graficar los espectros por medio del Software Origin Lab 2021b.

Se realizó la superposición de las gráficas con el fin de observar la tendencia de las mismas y la aparición de grupos funcionales mediante la observación de la intensidad de los picos.

Finalmente se determinó el índice de carbonilo (IC) para cada tipo de zuncho, se utilizó el método del área específica bajo la banda, denominado SAUB por sus siglas en inglés (Almond et al., 2020). Para el cálculo de las áreas bajo la curva también se utilizó el software Origin Lab 2021b.

### **2.3.2 Ensayo DSC**

Los ensayos de caracterización térmica se llevaron a cabo mediante un análisis calorimétrico diferencial de barrido de acuerdo a la norma ASTM D3417. Se utilizó el equipo marca TA Instruments Q200, la temperatura del barrido se encontró en un rango de 23 a 200°C con un flujo de calor de 10°C/min sin considerarse la transición vítrea. El peso de las muestras oscilaba en un rango de 7.7-8.3 mg.

Los valores de las temperaturas de fusión y entalpías fueron calculados por medio del software integrado en el calorímetro, para hallar los valores de entalpia se

trazó una línea base en cada pico térmico del Figura con el fin de que el programa detecte dicha línea y dé como resultado el valor de entalpía en ese punto.

Se calcularon también los valores de cristalinidad de las muestras mediante los resultados obtenidos de entalpías de fusión.



**Figura 2.5 Calorímetro TA Instruments.**

[LEMAT ESPOL]

### **2.3.3 Ensayo SEM**

El ensayo de SEM se llevó a cabo en un microscopio electrónico de barrido marca FEI Quanta Inspect con una magnitud de 100x y una distancia WD en un rango de 9.2 a 10.1mm, se utilizó un detector de electrones retro dispersados difractados (BSED). El ensayo se desarrolló en base a la norma ASTM E 986.

El análisis FTIR nos permitió identificar las muestras que presentaron mayor degradación para poder seleccionar aquellas que se someterían al ensayo SEM.



**Figura 2.6 Microscopio electrónico de barrido.**

[LEMAT ESPOL]

### 2.3.4 Ensayo de tensión

Los ensayos de tensión se llevaron a cabo siguiendo la norma ASTM D3950-16 mediante el equipo MUE 10kN (A-EM-010) con una velocidad de ensayo de 127 mm/min y una separación entre mordazas de 150mm, las condiciones ambientales fueron las siguientes: temperatura: 21.5 a 22.6°C, humedad: 55.6% a 58.1%.



**Figura 2.7 Equipo para ensayo de tensión.**

[LEMAT ESPOL]

Para cada zuncho se obtuvieron resultados de carga máxima en kgf y alargamiento en mm. Finalmente, la última etapa consistió en la evaluación y análisis de los resultados obtenidos en los ensayos para poder establecer una correlación entre las propiedades químicas, físicas y mecánicas de los zunchos plásticos utilizados en el medio agrícola y su resistencia a la degradación.

# CAPÍTULO 3

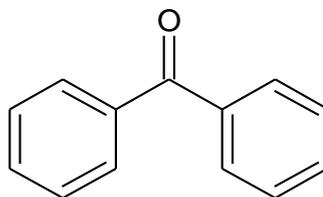
## 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Identificación de la composición de las muestras.

El análisis espectroscópico de las muestras en el tiempo 0, es decir las muestras en su estado natural, nos permitió identificar las bandas de absorción que caracterizan a estos polímeros y de esta manera determinar la composición de los mismos. Se pudo identificar que la muestra 20-5391 correspondía a un Polietileno de baja densidad (PEBD), esto se pudo determinar en base a los resultados obtenidos en los ensayos FTIR y DSC en conjunto para corroborar los análisis.

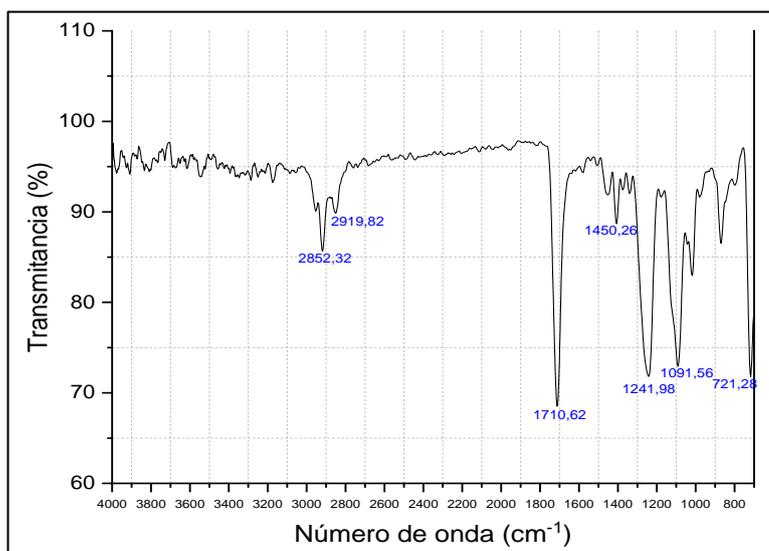
Al analizar el espectro infrarrojo (Figura 3.1) se pudieron diferenciar las siguientes bandas características: alrededor de  $721\text{cm}^{-1}$  se observó el pico característico de flexión del  $\text{CH}_2$ , en la región de  $1700\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$ , específicamente en  $1710\text{ cm}^{-1}$  se observó el pico correspondiente a los enlaces  $\text{C}=\text{O}$  de los ácidos carboxílicos o cetonas, en  $1000\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$  se identificaron las tensiones características de los enlaces de los anillos aromáticos, en  $1450\text{ cm}^{-1}$  se observó el pico del enlace  $\text{C}-\text{C}$  y finalmente se observaron los picos de absorción de los enlaces  $\text{C}-\text{H}$  en la región de  $2800\text{-}2900\text{ cm}^{-1}$ .

La mayoría de los picos encontrados en el espectro nos indicaron que la muestra se trataba de un PEBD, se infirió que los picos observados de carbonilo y del anillo aromático se debían a la presencia de un aditivo anti UV en la composición de esta muestra, en base a la bibliografía consultada se determinó que el aditivo se trataba de una benzofenona, la cual es una cetona aromática y en su estructura contiene los grupos identificados en el espectro: El grupo  $\text{C}=\text{O}$  encontrado en  $1710\text{ cm}^{-1}$  y el anillo aromáticos encontrado de  $1000\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$ . Este compuesto es utilizado comúnmente como aditivo en polímeros por su capacidad de absorción de la radiación UV.



**Figura 3.1 Estructura de la benzofenona.**

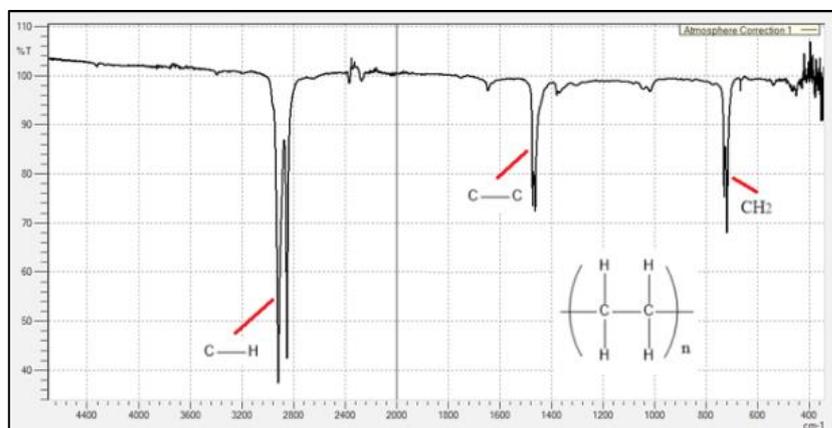
[Elaborado en ChemSketch]



**Figura 3.2 FTIR muestra 20-5391 en t=0.**

[Elaboración propia]

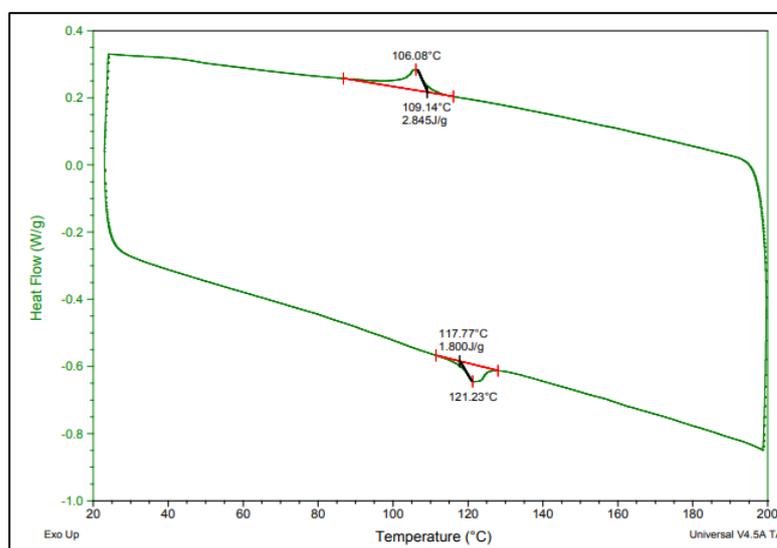
El espectro teórico del PEBD (Figura 3.2) nos permitió realizar una comparación con espectro obtenido en la muestra 20-5391 (Figura 3.3) (Velandia, 2017).



**Figura 3.3 FTIR teórico del PEBD.**

[Velandia, 2017]

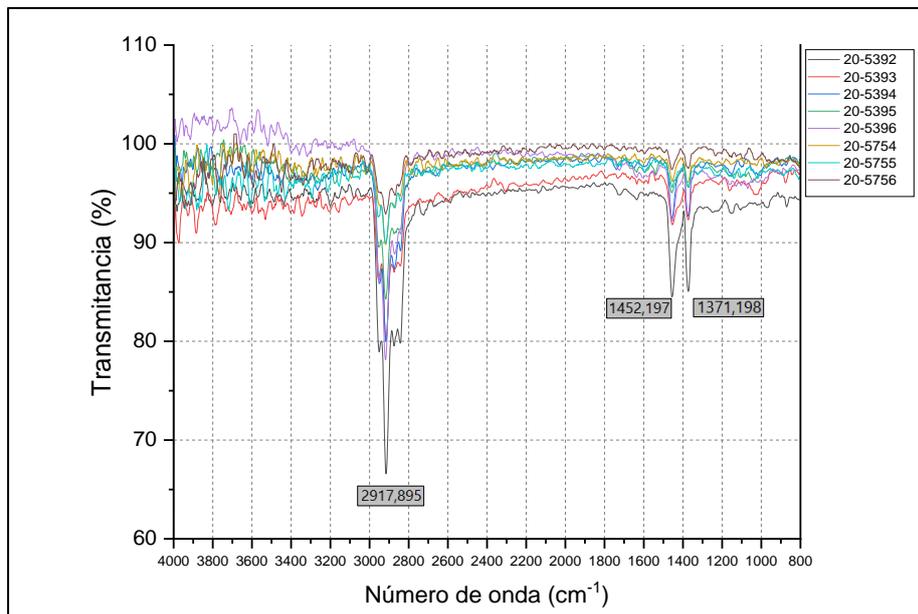
Al analizar el termograma obtenido por medio del análisis DSC (Figura 3.3) se pudo evidenciar el pico endotérmico perteneciente al punto de fusión de la muestra 20-5391 que se encuentra en un valor de 121.23°C, este se asemeja al punto de fusión teórico del PEBD el cual se encuentra en un rango entre 105 y 115°C, la variación que existe en el punto de fusión de la muestra analizada con respecto al teórico puede deberse a la presencia del aditivo. Se determinó entonces que la mayor parte de este zuncho contiene en su composición PEBD y un aditivo anti UV con una cetona aromática en su composición como lo es la benzofenona.



**Figura 3.4 DSC muestra 20-5391 en t=0.**

[Elaboración propia]

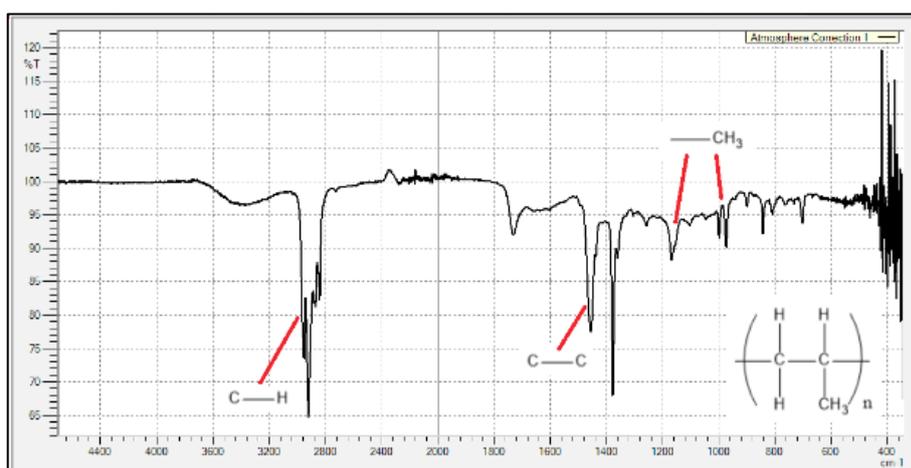
Las muestras restantes (205392, 205393, 205394, 205395, 205396, 205754, 205755 y 205756) presentaron un espectro muy similar entre ellas, con algunas variaciones mínimas en ciertos picos, al analizarlos (Figura 3.4) se identificaron los siguientes con una mayor intensidad: vibraciones del grupo C-H en una región cercana a los 2900  $\text{cm}^{-1}$ , movimientos de tensión C-C en la región de 1350-1450  $\text{cm}^{-1}$  y movimientos de flexión del  $\text{CH}_3$  entre 1000-1200  $\text{cm}^{-1}$ . Estos corresponden a los picos característicos del Polipropileno.



**Figura 3.5 FTIR muestras PP en t=0.**

[Elaboración propia]

El espectro teórico del PP (Figura 3.6) nos permitió realizar una comparación con espectros obtenidos en la muestras 205392, 205393, 205394, 205395, 205396, 205754, 205755, 205756 (Figura 3.5) (Velandia, 2017).



**Figura 3.6 FTIR teórico del PP.**

[Velandia, 2017]

Haciendo un análisis de cada espectro se pudo corroborar que la muestra 20-5392 no presentaba aditivos UV en su composición pues no se pudieron observar picos en otras longitudes de onda. La muestra 20-5393 presentó un pico en  $1037\text{ cm}^{-1}$

por lo que se determinó que si contenía un aditivo anti UV, este pico es característico de la banda de vibración de tensión del grupo C-O-C el cual se encuentra presente en la composición de aditivos plastificantes y estabilizantes contra la luz UV.

Por medio de los termogramas obtenidos en el ensayo DSC (apéndice A) para estas muestras, se pudo definir que las muestras 20-5392, 20-5393 y 20-5756 contenían una mezcla de PE y PP puesto que se pudieron observar 2 picos endotérmicos cuyas temperaturas de fusión fueron para el primer pico de 125.02°C, 126.96°C y 125.58°C respectivamente y para el segundo pico 163.58°C ,164.68°C y 162.96°C respectivamente. Estas temperaturas se aproximan a las temperaturas de fusión teóricas del PE y PP que son de 115°C y 160°C respectivamente.

El resto de las muestras presentó 1 solo pico endotérmico con una temperatura de fusión en un rango de entre 162 a 165°C por lo cual también se comprueba que estas muestras están elaboradas de PP. Finalmente se resumen en la tabla siguiente los resultados acerca de la composición de las muestras.

**Tabla 3.1 Resultados composición de zunchos plásticos.**

N°	Muestra	Código	Composición
1	Amarillo liso C	20-5391	100% PEBD virgen, Con aditivo anti UV: Probablemente Benzofenona
2	Negro liso P	20-5392	Mixto PEBD virgen + PP virgen Sin aditivo anti UV
3	Verde liso B	20-5393	Mixto 60% PP virgen + 40% PP reciclado con trazas de PEBD Con aditivo anti UV
4	Negro labrado R	20-5394	100% PP reciclado Con aditivo anti UV
5	Negro labrado M	20-5395	Mixto 75% PP virgen + 25% PP reciclado Con aditivo anti UV
6	Blanco labrado V	20-5396	100% PP virgen alta tensión Sin aditivo anti UV
7	Blanco labrado L	20-5754	100% PP virgen Con aditivo anti UV

8	Azul labrado Z	20-5755	100% PP virgen Con aditivo anti UV
9	Azul labrado mixto E	20-5756	Mixto 75% PP virgen + 25% PP reciclado con trazas de PE Con aditivo anti UV

### 3.2 Análisis de las muestras en el proceso de degradación

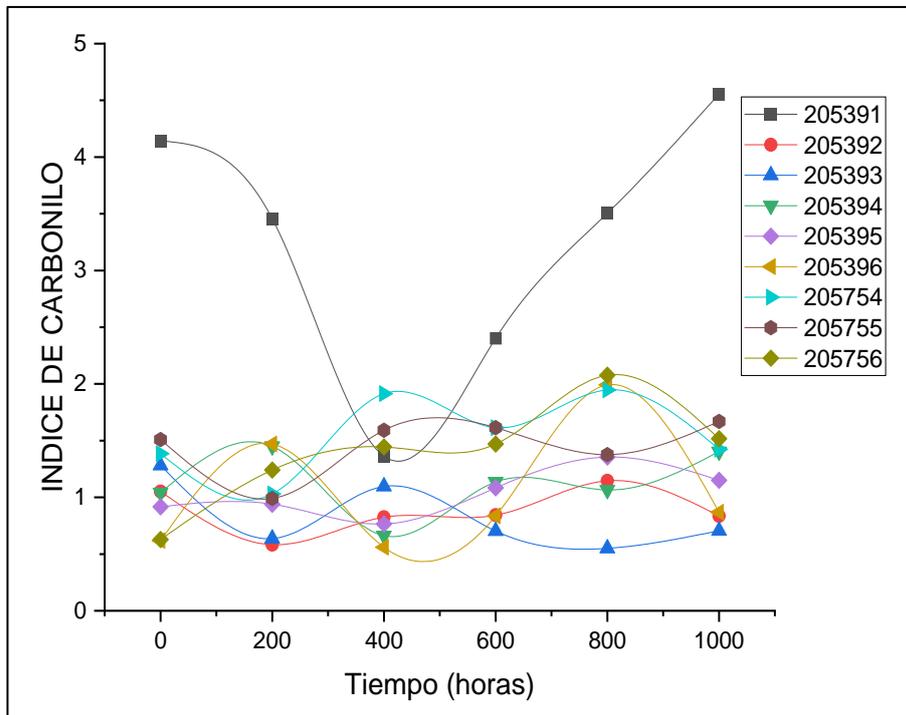
En esta sección se presenta un análisis a detalle del efecto de degradación natural y acelerada en las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las muestras.

#### 3.2.1 Propiedades químicas

Se analizaron los espectros obtenidos del ensayo FTIR y se cuantificaron estos resultados por medio del índice de carbonilo. A continuación, se encuentran tabulados y graficados los resultados obtenidos.

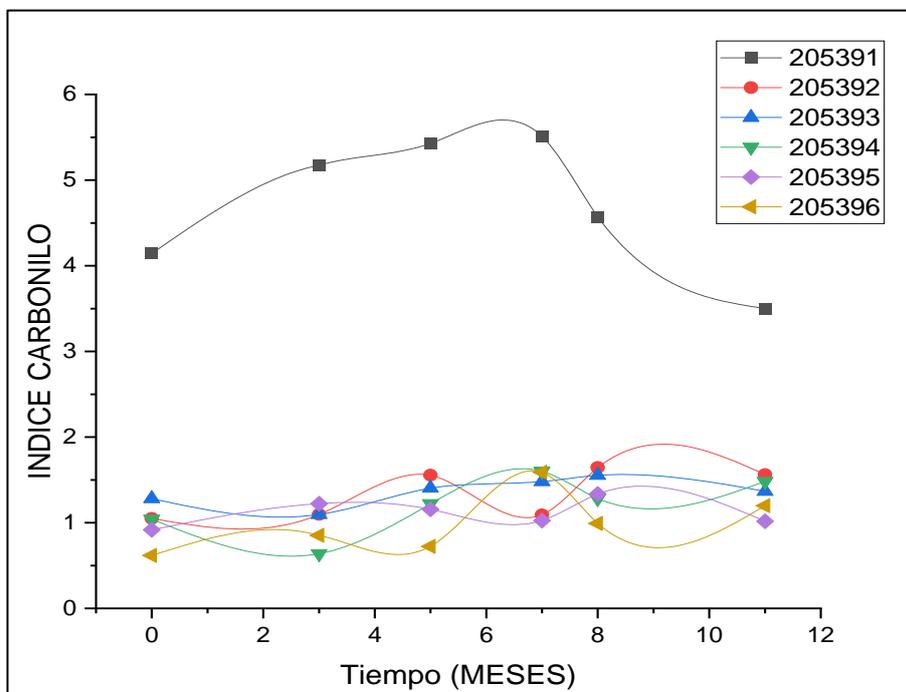
**Tabla 3.2 Resultados de IC.**

		Índice de carbonilo								
	Tiempo (h)	20-5391	20-5392	20-5393	20-5394	20-5395	20-5396	20-5754	20-5755	20-5756
Artificial	0	4.142	1.051	1.282	1.041	0.917	0.618	1.385	1.510	0.628
	200	3.456	0.583	0.636	1.450	0.939	1.470	1.031	0.990	1.241
	400	1.362	0.825	1.097	0.663	0.766	0.560	1.915	1.592	1.445
	600	2.402	0.843	0.703	1.136	1.084	0.836	1.614	1.614	1.470
	800	3.504	1.146	0.551	1.066	1.355	1.992	1.947	1.377	2.077
	1000	4.557	0.837	0.706	1.404	1.15	0.868	1.424	1.670	1.517
	<b>Desv. Est</b>	1.072	0.180	0.265	0.261	0.189	0.511	0.318	0.229	0.428
Natural	3 meses	3.456	0.583	0.636	1.450	0.939	1.470	-	-	-
	5 meses	1.362	0.825	1.097	0.663	0.766	0.560	-	-	-
	7 meses	2.402	0.843	0.703	1.136	1.084	0.836	-	-	-
	8 meses	3.504	1.146	0.551	1.066	1.355	1.992	-	-	-
	11 meses	4.557	0.837	0.706	1.404	1.150	0.868	-	-	-
		<b>Desv. Est</b>	0.728	0.256	0.147	0.313	0.141	0.324		



**Figura 3.7 IC en muestras de degradación artificial.**

[Elaboración propia]



**Figura 3.8 IC en muestras de degradación natural.**

[Elaboración propia]

Mediante estos resultados se pudo observar que los valores de IC de la muestra 205391 tuvieron un comportamiento muy diferente al de las demás muestras, esto se puede causar porque se trata de diferentes polímeros, la muestra 205391 se trata de PEBD mientras las demás son de PP. Estos análisis son comparables debido a que se puede determinar el comportamiento del IC mediante la variación entre los resultados sin importar el valor numérico que hayan tenido.

Puesto que las muestras fueron degradadas, se esperaba un comportamiento creciente en los valores del IC, sin embargo, no fue el comportamiento que siguieron todas las muestras durante todos los intervalos de tiempo analizados, esto se debe a que el material en ciertos intervalos de tiempo sufre una pérdida de los compuestos oxidados presentes en la estructura del polímero debido a un arreglo estructural que genera fluctuaciones en la banda carbonílica.

Se pudo observar que en el tiempo inicial tanto en la degradación natural como artificial el índice de carbonilo no fue de cero, esto se debe a que se trata de muestras comerciales, que contienen en su composición aditivos plastificantes, de protección UV, pigmentos, estabilizantes, entre otros que en su estructura molecular poseen el grupo carbonilo.

Se determinó que la degradación se medía respecto a la variación de los resultados del IC de cada muestra, por lo que ordenando las muestras de acuerdo a su degradación (de menor a mayor), se obtuvo el siguiente orden: 205391, 205392, 205395, 205755, 205394, 205393, 205754, 205756 y 205396. Para el ensayo natural se obtuvo el siguiente orden: 205391, 205396, 205394, 205392, 205393 y 205395.

Se pudo observar que en ambos tipos de degradación no se tiene el mismo orden respecto a la degradación de las muestras, esta variación observada se debe a que en el ensayo natural las muestras fueron influenciadas por las condiciones ambientales a las que estuvieron sometidas mientras que en la degradación natural estuvieron bajo parámetros controlados.

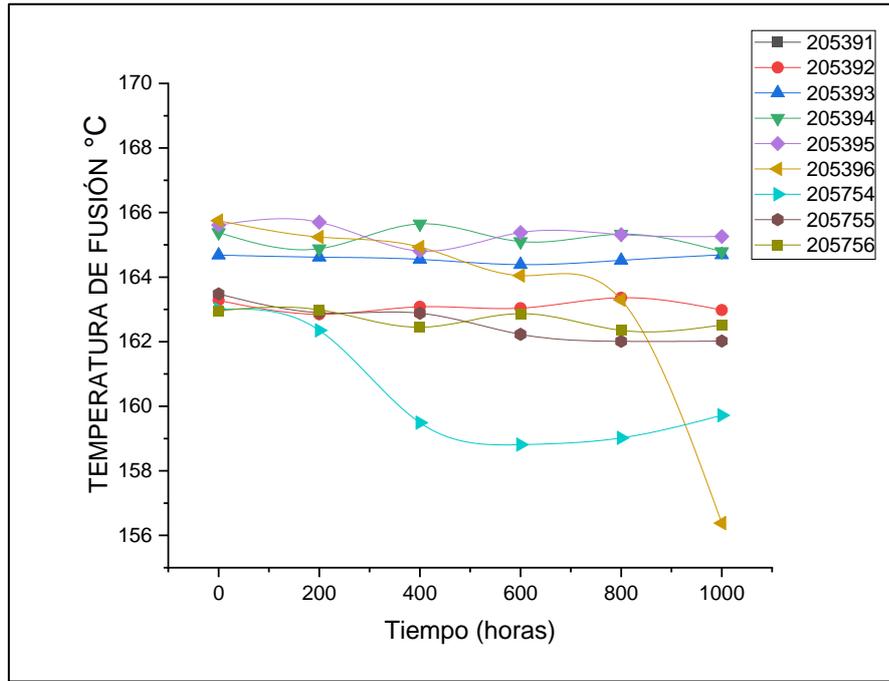
De manera general se pudo observar que para ambos ensayos la muestra 205391 presentó mayor variación, es decir tuvo una mayor degradación y la muestra 205395 presentó menor variación, es decir tuvo una menor degradación.

### 3.2.2 Propiedades físico químicas

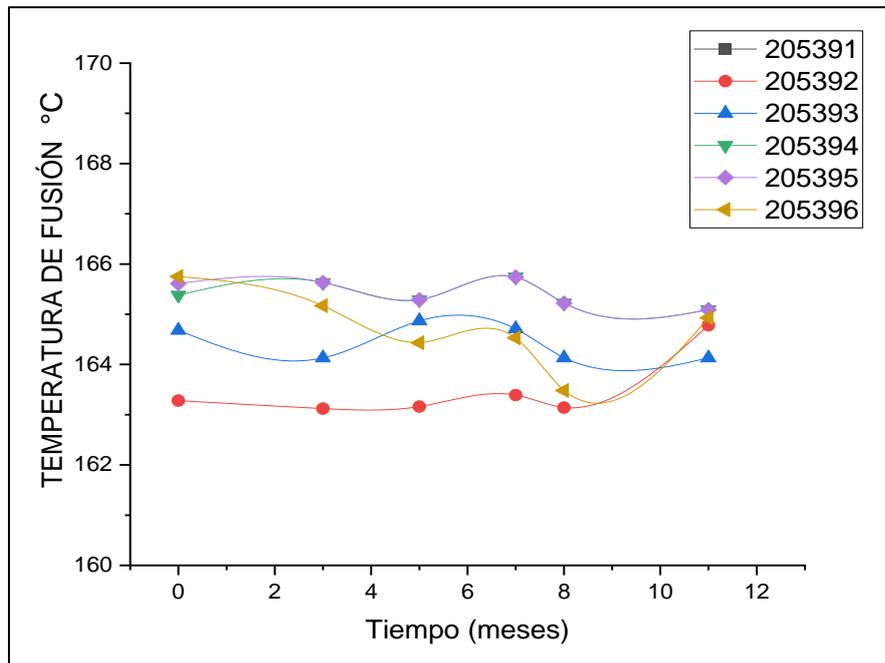
Se analizaron los termogramas obtenidos mediante el ensayo DSC en los cuales se pudo obtener resultados de temperaturas y entalpías de fusión e índice de cristalización. Los análisis se realizaron en base a la temperatura de fusión.

**Tabla 3.3 Resultados temperaturas de fusión.**

Temperaturas de fusión (°C)										
	Tiempo	20-5391	20-5392	20-5393	20-5394	20-5395	20-5396	20-5754	20-5755	20-5756
Artificial	0 h	121.23	163.28	164.68	165.38	165.61	165.75	163.00	163.48	162.96
	200 h	122.96	162.85	164.62	164.88	165.70	165.24	162.35	162.90	162.99
	400 h	123.34	163.08	164.55	165.65	164.81	164.93	159.49	162.88	162.45
	600 h	123.47	163.04	164.39	165.10	165.38	164.05	158.81	162.23	162.87
	800 h	123.46	163.36	164.52	165.33	165.32	163.30	159.02	162.01	162.35
	1000 h	123.72	162.98	164.69	164.79	165.26	156.38	159.72	162.02	162.52
	Desv. Est	0.84	0.17	0.10	0.30	0.29	3.19	1.77	0.54	0.26
Natural	3 meses	123.29	163.12	164.13	164.98	165.63	165.17	-	-	-
	5 meses	122.08	163.16	164.87	164.81	165.29	164.43	-	-	-
	7 meses	122.19	163.39	164.71	164.74	165.74	164.53	-	-	-
	8 meses	123.01	163.14	164.13	164.58	165.22	163.48	-	-	-
	11 meses	106.50	164.78	164.13	165.35	165.09	164.93	-	-	-
	Desv. Est	6.47	0.64	0.33	0.26	0.25	0.58			



**Figura 3.9 Temp. de fusión en muestras de degradación artificial.**  
[Elaboración propia]



**Figura 3.10 Temp. de fusión en muestras de degradación natural.**  
[Elaboración propia]

Se pudo observar que al igual que en el parámetro de IC la muestra 205391 presentó un comportamiento distinto respecto a las demás muestras pues al ser polímeros diferentes sus puntos de fusión también son diferentes. En las figuras solo se mostraron los resultados de las muestras de PP puesto que al graficarse junto con la muestra 205391 no eran apreciables sus tendencias.

Se esperaba un comportamiento decreciente para los resultados de la temperatura de fusión puesto que esta propiedad se relaciona con los enlaces del polímero los cuales al degradarse se separan causando la disminución del peso molecular del compuesto y a su vez la disminución del punto de fusión, sin embargo, los resultados no siguieron esa tendencia a excepción de las muestras 205396 y 205754. Se determinó que la degradación se podía medir respecto a la variación de los resultados de temperatura de fusión, por lo que con la desviación estándar se determinó el siguiente orden de degradación (de menor a mayor): 205396, 205754, 205391, 205755, 205394, 205395, 205756, 205392 y 205393. Para el ensayo natural se obtuvo el siguiente orden: 205391, 205392, 205396, 205393, 205394, 205395.

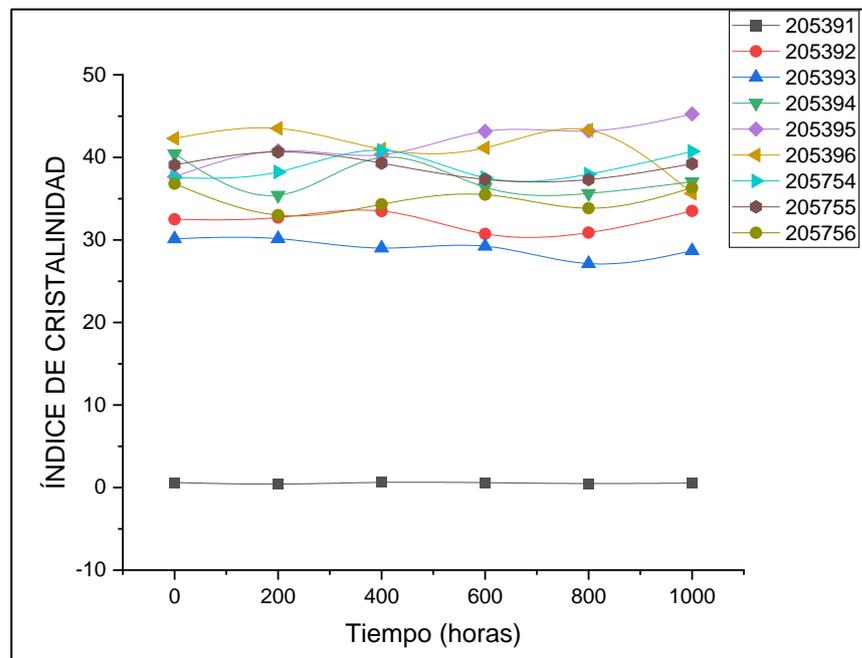
En general, las temperaturas de fusión no tuvieron una variación significativa, a excepción de las muestras 205396 y 205754 en la degradación artificial, lo cual quiere decir que estas muestras sufren una degradación mayor.

Los comportamientos de las muestras de degradación artificial y natural no fueron los mismos y esto se debe a que las condiciones naturales y artificiales fueron distintas y esto afectó de gran manera al ordenamiento molecular y por ende la temperatura de fusión.

Por medio de los resultados de las entalpías de fusión se pudo calcular los valores del índice de cristalinidad de las muestras los mismos que se encuentran en la tabla 3.4 y fueron graficados en la figura 3.11.

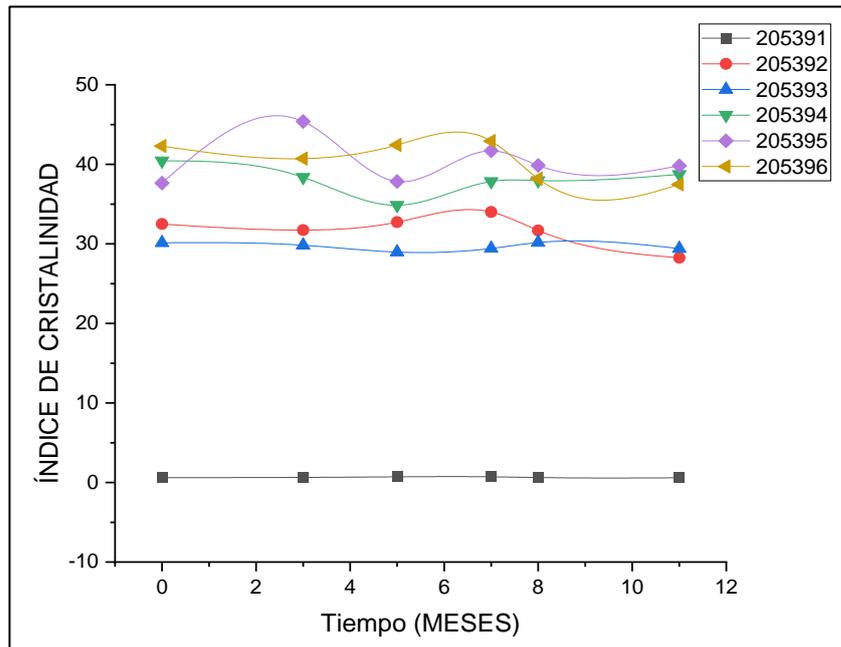
**Tabla 3.4 Resultados cristalinidad.**

Índice de Cristalinidad										
	Tiempo (h)	20-5391	20-5392	20-5393	20-5394	20-5395	20-5396	20-5754	20-5755	20-5756
Artificial	0	0.61	32.49	30.13	40.44	37.64	42.30	37.54	39.08	36.81
	200	0.43	32.71	30.16	35.41	40.80	43.52	38.23	40.67	33.00
	400	0.63	33.50	29.01	39.99	40.33	41.01	40.85	39.31	34.31
	600	0.60	30.73	29.24	36.39	43.15	41.16	37.53	37.33	35.49
	800	0.50	30.89	27.13	35.63	43.21	43.31	37.96	37.32	33.83
	1000	0.55	33.51	28.69	37.04	45.27	35.63	40.73	39.24	36.31
	<b>Desv. Est.</b>	0.070	1.123	1.021	2.006	2.459	2.649	1.424	1.182	1.358
Natural	3 meses	0.64	31.74	29.83	38.37	45.39	40.71	-	-	-
	5 meses	0.71	32.73	28.97	34.85	37.84	42.43	-	-	-
	7 meses	0.72	34.00	29.43	37.84	41.69	42.92	-	-	-
	8 meses	0.62	31.68	30.17	37.97	39.86	38.19	-	-	-
	11 meses	0.60	28.25	29.41	38.72	39.82	37.47	-	-	-
	<b>Desv. Est.</b>	0.048	1.911	0.408	1.385	2.545	2.192			



**Figura 3.11 Índice de cristalinidad en degradación artificial.**

[Elaboración propia]



**Figura 3.12 Índice de cristalinidad en degradación natural.**

[Elaboración propia]

Se pudo observar que la muestra 205391 presenta un comportamiento muy diferente a las demás muestras para esta propiedad al igual que en las anteriormente analizadas, la tendencia esperada para estos resultados era creciente sin embargo no se observó dicha tendencia, los resultados presentaron un comportamiento variado.

Al analizar esta propiedad se puede determinar que se están afectando la cantidad de cristales presentes debido al re- arreglo que sufre la estructura al ser expuesta a la radiación UV, estas modificaciones se observaron en un rango pequeño.

La cristalinidad puede ser estudiada mediante la variación entre los resultados obtenidos para cada muestra, por medio de la desviación estándar se determinó que el orden de degradación en las muestras (de menor a mayor) fue: 205396, 205395, 205394, 205754, 205756, 205755, 205392, 205393 y 205391 para degradación artificial y 205395, 205396, 205392, 205394, 205393 y 205391 para degradación natural.

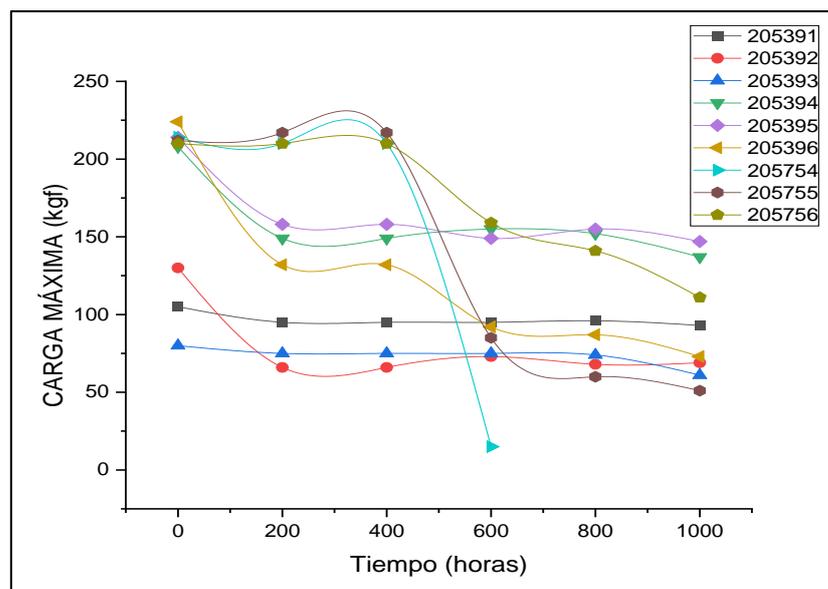
Se pudo determinar que en ambos ensayos de degradación se obtuvo un comportamiento similar de las muestras obteniéndose que la que más se degradó según esta propiedad fue la 205396 y la que menos se degradó fue la 205391.

### 3.2.3 Propiedades mecánicas

Mediante los ensayos mecánicos se pudo obtener resultados de resistencia a la tensión de cada una de las muestras en los diferentes tiempos de degradación, estos se detallan en la siguiente tabla:

**Tabla 3.5 Resultados carga máxima.**

Tiempo	Muestras Exposición artificial								
	205391	205392	205393	205394	205395	205396	205754	205755	205756
<b>Carga máxima (kgf)</b>									
<b>0</b>	105	130	80	208	214	224	214	212	210
<b>200</b>	95	66	75	149	158	132	210	217	210
<b>400</b>	95	66	75	149	158	132	210	217	210
<b>600</b>	95	73	75	155	149	92	15	85	159
<b>800</b>	96	68	74	152	155	87	-	60	141
<b>1000</b>	93	69	61	137	147	73	-	51	111



**Figura 3.13 Carga máxima en degradación artificial.**

[Elaboración propia]

La carga máxima se analizó tomando en cuenta los resultados de mayor valor numérico puesto que a diferencia de las otras propiedades la variación no proporciona información suficiente para concluir puesto que para esta propiedad es más importante analizar las muestras que resistieron mayores cargas.

Se pudo observar que las muestras 20-5394, 20-5395 y 20-5756 a lo largo del proceso de degradación presentaron los valores más altos de carga máxima, los resultados se encontraron en un rango de entre 141 y 210 kgf, luego se encontraron las muestras 20-5391, 20-5392 y 20-5393 con resultados en un rango de 61 a 224 kgf y finalmente las muestras 20-5396, 20-5754 y 20-5755 estando en un rango entre 15 y 217 kgf.

La desviación estándar nos permitió entender el comportamiento individual de cada muestra ante la degradación mecánica, se determinó que la muestra 20-5391 presentó la menor variación de carga máxima, siendo así que se mantuvo casi constante a lo largo del tiempo, este comportamiento fue ideal, sin embargo, no se pudo concluir que esta fue la muestra de mejor rendimiento pues presentó valores relativamente bajos de carga máxima en comparación a otras.

La muestra 20-5754 en un tiempo de 600 horas resistió una carga máxima de apenas 15kgf y a las 800 horas se pulverizó. Esta muestra junto con las muestras 20-5392 y 20-5755 se han considerado las muestras más afectadas por la exposición acelerada debido a que se evidenciaron en ellas cambios significativos luego de las 400 horas de exposición.

Finalmente se reunieron los resultados de todas las propiedades en la tabla 3.6 y se les otorgó una ponderación del 1 al 9 para la degradación artificial y del 1 al 6 para la degradación natural, de acuerdo al nivel de degradación que presentaba la muestra según cada ensayo, luego se sumaron sus ponderaciones y se establecieron las muestras que a nivel de todos los ensayos presentaron mayor y menor degradación.

DEGRADACIÓN ↑		IC	T FUSION	CRISTALINIDAD	CARGA MÁXIMA
	9	205391	205754	205396	205754
	8	205396	205396	205395	205755
	7	205756	205755	205394	205396
	6	205754	205756	205754	205393
	5	205393	205392	205756	205392
	4	205394	205391	205755	205391
	3	205755	205393	205392	205756
	2	205395	205394	205393	205394
	1	205392	205395	205391	205395

**Tabla 3.6 Resultados propiedades degradación artificial.**

DEGRADACIÓN ↑		IC	T FUSION	CRISTALINIDAD
	6	205391	205391	205395
	5	205396	205392	205396
	4	205394	205396	205392
	3	205392	205393	205394
	2	205393	205394	205393
	1	205395	205395	205391

**Tabla 3.7 Resultados propiedades degradación natural.**

Muestra	Ponderación artificial	Ponderación natural
205395	4	8
205394	8	9
205392	11	12
205393	14	7
205756	16	-
205391	17	13
205755	18	-
205396	23	14
205754	24	-

**Tabla 3.8 Ponderación total de degradación.**

Se pudo determinar que las muestras que presentaron una mayor resistencia ante la degradación artificial y natural fueron: 205395 y 205394 y la que presentó menor resistencia ante ambos tipos de degradación fue la muestra 205396.

#### **3.2.4 Propiedades físicas del material.**

Durante los ensayos realizados se pudo observar los siguientes cambios físicos: las muestras 20-5396, 20-5754 y 20-5755 presentaron desprendimiento de material, fisuras y agrietamientos, las muestras 20-5394, 20-5395 y 20-5756 presentaron una progresiva pérdida de color pero no hubo desprendimientos de material, fisuras ni agrietamiento, finalmente las muestras 20-5391, 20-5392 y 20-5393 presentaron una progresiva pérdida de color y no hubo desprendimientos de material, fisuras ni agrietamiento.

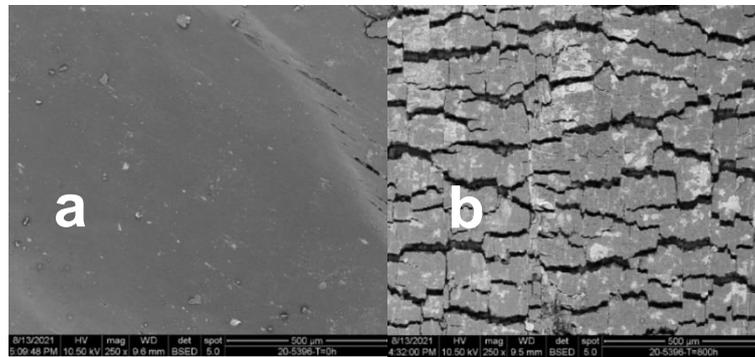
Por medio del ensayo SEM se pudo obtener una visión más clara de cómo afecta el proceso de degradación a la superficie de las muestras. A través de los resultados de los ensayos mecánicos se pudo determinar que las muestras que presentan mayor degradación son las muestras 20-5396, 20-5754 y 20-5755.

La figura 3.7 a muestra cómo se encontraba el zuncho 20-5396 inicialmente, donde se evidencia la presencia de pequeñas fisuras en la superficie, esto se debe a que se desconoce si las muestras dadas eran completamente nuevas o si ya habían pasado por un proceso de degradación previamente o en su defecto a condiciones de procesamiento de la muestra. Luego de ser expuesta a un proceso de degradación en lámparas UV, se puede apreciar daño superficial en la muestra 20-5396. La figura 3.7 b representa como se encontraba la superficie de la muestra a las 800 horas de exposición UV, se observa la presencia de grietas de mayor tamaño, fisuras y pérdidas en la intensidad de pigmentación en ciertas secciones.

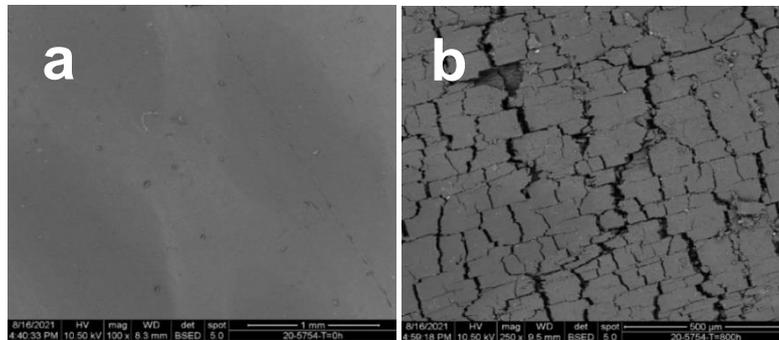
Al analizar la microfotografía (Figura 3.8 a) de la muestra 20-5754 se visualiza que inicialmente se encontraba lisa, sin fisuras ni grietas, sin embargo, al someterse a un proceso de degradación se observa cómo los cambios estructurales en la

superficie indican un proceso de envejecimiento en dicha muestra los cuales son manifestados, en forma de grietas y ruptura del material (Figura 3.8 b).

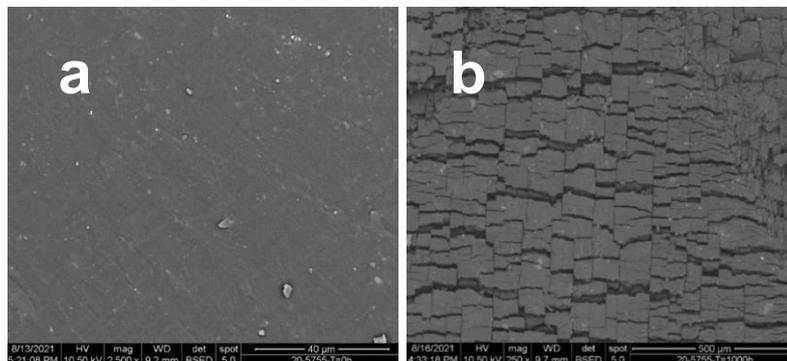
El mismo comportamiento se observó para la muestra 20-5755 donde inicialmente la muestra no presentó indicios de degradación (Figura 3.9 a) ya que, tenía la superficie libre de grietas y rotura, sin embargo, al terminar el ciclo de exposición UV, a las 1000 horas se evidenciaron grietas y daños estructurales a nivel superficial (Figura 3.9 b).



**Figura 3.14** Microfotografía de la muestra 20-5396. a) t=0 h b) t=800 h



**Figura 3.15** Microfotografía de la muestra 20-5754. a) t=0 h b) t=800 h



**Figura 3.16** Microfotografía de la muestra 20-5755. a) t=0 h b) t=800 h

### **3.3 Análisis de correlaciones entre propiedades**

Con el fin de identificar los pares de variables que se relacionan entre sí se establecieron correlaciones entre los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos químicos, físico- químicos y mecánicos.

El análisis de correlación se realizó teniendo como referencia al índice de carbonilo ya que es la propiedad que indica si la degradación aumenta o disminuye a nivel molecular en cada una de las muestras. A mayor degradación existirá un aumento en el índice de carbonilo debido a la presencia de compuestos oxidativos de las muestras degradadas.

Al analizar el efecto de la degradación sobre la carga máxima, se pudo observar que esta se relaciona de forma inversamente proporcional con el índice de carbonilo, es decir que a medida que el material es expuesto a condiciones externas de degradación va a soportar menos esfuerzo de carga máxima. Este comportamiento se pudo observar en las muestras 205391, 205755 y 205756 (Apéndice B, figuras B1, B8 y B9).

Al analizar el efecto de la degradación sobre la cristalinidad, se pudo observar que se relacionan de forma directamente proporcional con el índice de carbonilo, el aumento de la cristalinidad se genera como respuesta a la oxidación en el material lo cual a su vez hace que disminuya el peso molecular y esto se evidencia en la presencia de grietas en el material. Las muestras que presentaron este comportamiento fueron 205393, 205395, 205754, 205755 y 205756 (Apéndice C, figuras C3, C5, C7, C8 y C9).

Finalmente se analizó el efecto de la degradación sobre la temperatura de fusión, se pudo observar que se relaciona de manera inversamente proporcional con el índice de carbonilo, es decir que a medida que aumenta la degradación el material sufre cambios en sus propiedades térmicas debido al reordenamiento molecular y en consecuencia se produce una disminución en la temperatura de fusión. Este

comportamiento se evidencia en las muestras 205391, 205395, 205396, 205754 y 205755. (Apéndice D, figuras D1, D5, D6 D7 y D8).

En cuanto a las muestras que no siguieron la tendencia esperada en cada una de las propiedades analizadas, se puede decir que debido a la presencia de aditivos anti UV, plastificantes, pigmentos y otros compuestos se produjo un reordenamiento a nivel molecular que hace que se produzcan fluctuaciones en los resultados de las propiedades físicas, químicas y mecánicas del material.

### 3.4 Análisis económico

Se realizó un análisis económico con el fin de proporcionar una idea al sector manufacturero encargado de la fabricación de los zunchos plásticos, de cuál sería el que presenta una mayor resistencia a la degradación, adaptándose de mejor manera en el medio agrícola y así satisfacer uno de los dolores que presentan los agricultores del sector bananero sobre el rendimiento de este producto.

Se estimaron los costos directos de aplicación y fabricación necesarios para montar una planta dedicada a la fabricación de los zunchos en la ciudad de Guayaquil, Ecuador. Los resultados obtenidos se detallan en la tabla a continuación.

**Tabla 3.9 Costos totales de inversión.**

Costos de implementación	\$ 3.389.997,55
Costos directos de fabricación	\$ 1.590.682,91
<b>Costos totales</b>	<b>\$ 4.980.680,91</b>

Para medir la rentabilidad de la implementación de una empresa que se dedique a la fabricación de zunchos, se determinó el Valor Actual Neto (VAN) el cual debe dar como resultado un valor mayor a cero para afirmar que el proyecto será viable. Se realizaron los cálculos con una proyección de 6 años para recuperar la inversión de puesta en marcha del negocio y se obtuvo que la inversión es recuperada a partir del primer año. El VAN dio como resultado un valor mayor a

0, indicando la rentabilidad del proyecto y la tasa a la cual se recupera la inversión inicial del proyecto dio como resultado un valor de 13,93%. La Tabla 3.7 resume los resultados más representativos del análisis de costos-beneficios que se empleó en el presente proyecto.

**Tabla 3.10 Flujo de caja proyectado en 6 años.**

Años	Flujo de caja
0	\$ -2.017.906,91
1	\$ 391.284,44
2	\$ 428.688,14
3	\$ 475.056,21
4	\$ 523.106,11
5	\$ 572.765,31
6	\$ 905.618,53
Rentabilidad	
<b>VAN</b>	<b>\$ 60.016,19</b>
<b>TIR</b>	<b>13,93%</b>

Se realizó una búsqueda bibliográfica con el fin de identificar el precio promedio de los zunchos plásticos en el mercado ecuatoriano, y así estimar el precio de venta al público de cada producto de acuerdo a su presentación. La tabla 3.8 resume el precio y las ganancias que se tendría por la venta de cada zuncho.

**Tabla 3.11 Ganancia de venta por producto.**

Descripción	Producto							
	100% PE virgen + aditivo	100% PP virgen	60% PP virgen +40% PP reciclado	100% PP reciclado + aditivo	75% PP virgen +25%PP reciclado	100%P P virgen +aditivo	PE virgen +PP virgen sin aditivo	Mixto 75% PP virgen + 25% PP reciclado con trazas de PE con aditivo
<b>Precio de venta</b>	\$36,64	38,57	\$ 32,4	\$ 30,00	\$ 35,60	\$ 42,13	\$ 40,50	\$41,10
<b>Margen de contribución</b>	<b>\$193,44</b>	<b>\$ 191,51</b>	<b>\$ 197,68</b>	<b>\$ 200,08</b>	<b>\$ 194,48</b>	<b>\$ 187,9</b>	<b>\$189,58</b>	<b>\$188,98</b>
<b>Ganancia al año</b>								<b>\$2.822,88</b>

# CAPÍTULO 4

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Las técnicas FTIR y DSC permitieron identificar la composición real de los zunchos plásticos, dando como resultado que ciertas muestras se componían de polipropileno, otras eran mixtas de PP/PE y también polietileno de baja densidad, además se evidenció presencia de aditivos anti UV en cierto grupo de muestras. De esta manera se considera que, por medio de caracterizaciones fisicoquímicas se puede identificar la composición de los materiales a analizar, sus características y las posibles mejoras en sus formulaciones para mejorar la calidad del producto.
- Por medio del ensayo SEM se evidenciaron los cambios superficiales en las muestras, tales como fisuras, grietas y pérdidas en la pigmentación de los zunchos. Los ensayos químicos y mecánicos permitieron analizar el comportamiento de las muestras, donde se observó que a nivel molecular existe un reordenamiento de las moléculas debido a presencias de aditivos y pigmentos. En cuanto a lo abordado anteriormente, es posible concluir que debido a que no se estudió un sistema modelado no se observa el comportamiento típico que debe presentar un polímero frente a la degradación.
- Por medio de análisis de correlaciones se determinó que la carga máxima y la temperatura de fusión se relacionan de forma inversamente proporcional con el índice de carbonilo y la cristalinidad vs al índice de carbonilo se relacionan de manera directamente proporcional.
- Por medio de los resultados obtenidos se pudo determinar que la muestra que presentó mayor resistencia ante la degradación natural y artificial fue la 20-5395. Mediante el análisis económico realizado, se determinó que el precio de

venta de dicho zuncho es de \$35.60 en ese sentido, se concluye que a los agricultores les conviene adquirir zunchos plásticos que en su composición presenten PP reciclado, ya que se evidenció un mejor comportamiento en los resultados de dichas muestras además, al mismo tiempo que se contribuye al cuidado del medio ambiente, se beneficia un sector de gran importancia económica para el país.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Si se desea obtener un estudio más amplio en cuanto a la influencia de la degradación en las propiedades físicas, químicas y mecánicas, se recomienda realizar la síntesis de los polímeros PE y PP para evitar la presencia de compuestos oxidativos en las muestras iniciales.
- Se recomienda realizar pruebas del tiempo de inducción a la oxidación (OIT) para la determinación de la concentración de los antioxidantes, estabilizantes y otros aditivos que se encuentran presentes en las muestras poliméricas.
- Realizar calibraciones de los equipos cada cierto tiempo para minimizar variaciones en las mediciones y errores en los resultados finales.

# BIBLIOGRAFÍA

- AlMaaded, M., Madi, N., & Hodzic, A. (2013). *Influence of additives on recycled polymer blends*. 115(1). <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3224-y>
- Almond, J., Sugumaar, P., Wenzel, M., Hill, G., & Wallis, C. (2020). *Determination of the carbonyl index of polyethylene and polypropylene using specified area under band methodology with ATR-FTIR spectroscopy*. 20(1). <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0041>
- American Society for Testing and Materials. (2015). *Standard Test Method for Thermal Oxidative Resistance of Carbon Fibers*. ASTM D4102-82. [www.astm.org](http://www.astm.org)
- Arandes, J., Bilbao, J., & López, D. (2004). *Reciclado de Residuos Plásticos*. 5(1). <http://files.juventudargentinasolidaria.webnode.com.ar/200000182-a7dd5a8d64/RECICLADO%20DE%20RESIDUOS%20PL%C3%81STICOSpdf.pdf>
- Benavides, D. (2015). *Propuesta de plan de mejoras en la línea de producción de la compañía Tecnoformas S.A.* [Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/3481/1/T-UCSG-PRE-ECO-ADM-171.pdf>
- Booma, M., Selke, S., & Giacín, J. (2004). *Degradable Plastics*. 26(2). <https://doi.org/10.1177/009524439402600203>

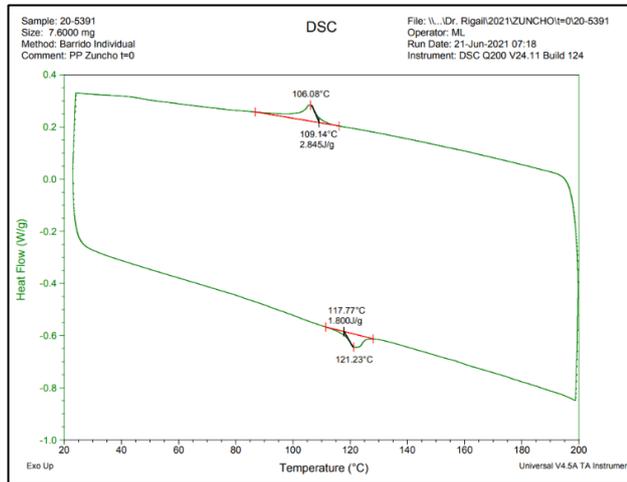
- Caicedo, C., Crespo, L., De La Cruz, H., & Alvarez, N. (2017). *Propiedades termomecánicas del Polipropileno: Efectos durante el reprocesamiento*. 18(3). <https://www.redalyc.org/pdf/404/40453142002.pdf>
- Costello, C., Bachman, S., & Ramshaw, B. (2007). *Materials Characterization of Explanted Polypropylene Hernia Meshes*. 83(1). <https://doi.org/10.1002/jbm.b.30764>
- Cristán, A., Gavilán, A., & Ize, I. (2003). *La situación de los envases de plásticos en México*. 69(2), 17.
- González, M. (2006). *Propiedades químicas y físicas de polímeros*. [https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/9641/CC\\_32\\_art\\_3.pdf;jsessionid=8D1D3B194F48A72EC4658269A2591530?sequence=1](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/9641/CC_32_art_3.pdf;jsessionid=8D1D3B194F48A72EC4658269A2591530?sequence=1)
- Hoyos, A., & Costa, C. (2018, septiembre 4). *La Industria del Plástico se mueve al ritmo de 600 empresas*. [Online]. <https://www.revistalideres.ec/lideres/industria-plastico-inversion-innovacion-ritmo.html>
- INIAP, Instituto Nacional de Investigación Agropecuarias. (2016). *Banano, plátano y otras musáceas*. <http://www.iniap.gob.ec/pruebav3/banano-platano-y-otras-musaceas/>
- Jobin, J., Nag, G., & Nando. (2014). *Environmental ageing studies of impact modified waste polypropylene*. 23(8). <https://doi.org/10.1007/s13726-014-0256-5>
- L.G. Wade, Jr. (2012). *Química Orgánica (Séptima, Vol. 2)*. Pearson.
- López, G. (2012). *Ventajas y Desventajas de los Plásticos Degradables para su Aplicación en la Agricultura Sustentable o Ecológica*. <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/371/1/Gorgonio%20Lopez%20Tolentino.pdf>

- Michler, G. H., & Baltá, F. J. (2005). *Mechanical Properties of Polymers based on nanostructure and morphology* (1.<sup>a</sup> ed., Vol. 1). Taylor & Francis Group.  
<http://docshare02.docshare.tips/files/27514/275146622.pdf>
- Mondragón, P. (2017). *Espesctroscopía de Infrarrojo para todos y 51 espectros de alimentos consumidos en México*.  
[https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion\\_5a43b7c09fdc1.pdf](https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5a43b7c09fdc1.pdf)
- Netzsch. (2014). *Grado de cristalinidad*. <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/es/commercial-testing/glosario/cristalinidad-grado-de-cristalinidad/>
- Pavlik, Z., Pavliková, M., & Záleská, M. (2019). *Properties of concrete with plastic polypropylene aggregates*. 189-213. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102676-2.00009-8>
- Plastics Europe, A. of P. M. (2019). *An analysis of European plastics production, demand and waste data*. 15(1).  
<https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>
- Posada, B. (2012). *La degradación de los plásticos*. 30(94).  
<https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1408>
- Roca, I. (2005). *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del Polietileno de alta densidad (PEAD)* [Tesis de Grado, Universidad de San Carlos de Guatemala].  
[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0639\\_Q.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0639_Q.pdf)
- Rouillon, C., Bussiere, P., Desnoux, E., & Collin, S. (2016). *Is Carbonyl Index a quantitative probe to monitor polypropylene photodegradation?* 128(200-208).  
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.12.011>

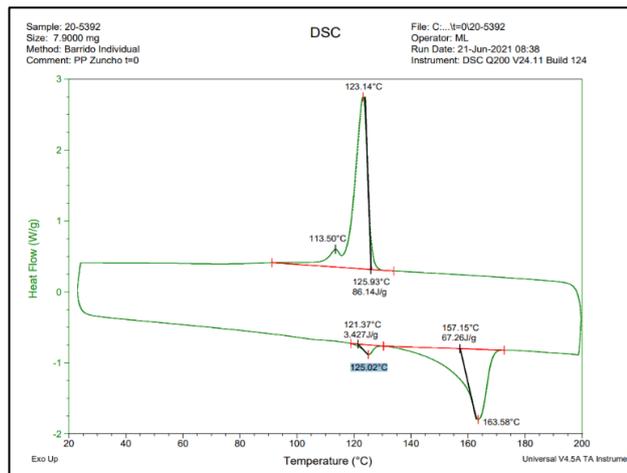
- San Andrés, M., Chércoles, R., & De La Roja. (2010). *Factores responsables de la degradación química de los polímeros. Efectos provocados por la radiación lumínica sobre algunos materiales utilizados en conservación: Primeros resultados.* <https://www.culturaydeporte.gob.es/dam/jcr:d7cb6b8e-3c5f-41d4-8726-6894ea9ea575/factrespxireinasof.pdf>
- Suriñach, S., Baro, M., & Clavaguera, N. (2012). *La calorimetría de barrido y su aplicación a la ciencia de materiales.* 31(1). <http://boletines.secv.es/upload/199231011.pdf>
- Tavares, A., Gulmine, J., & Lepienski, C. (2003). *The effect of accelerated aging on the surface mechanical properties of polyethylene.* 81(2), 7. [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(03\)00108-3](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(03)00108-3)
- Velandia, J. (2017). *Identificación de Polímeros por espectroscopía infrarroja.* 5(1). <https://journal.universidadean.edu.co/index.php/Revistao/article/view/2005/1776>
- Zhou, W., Apkarian, R., & Joy, D. (2006). *Fundamentals of Scanning Electron Microscopy.* 4(1). [https://doi.org/10.1007/978-0-387-39620-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-39620-0_1)

# APÉNDICES

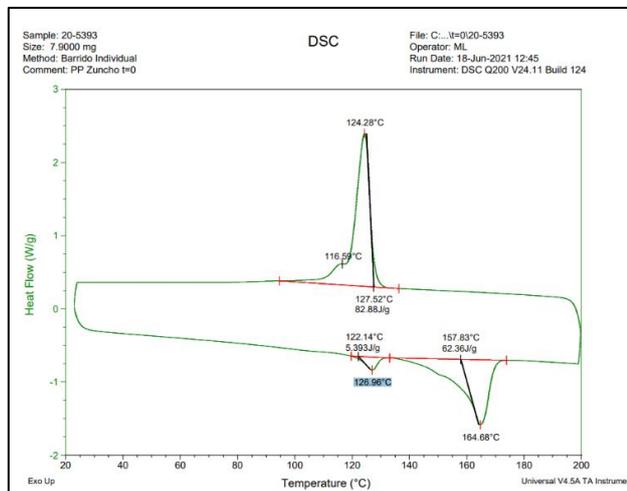
# APÉNDICE A: RESULTADOS ENSAYO DSC



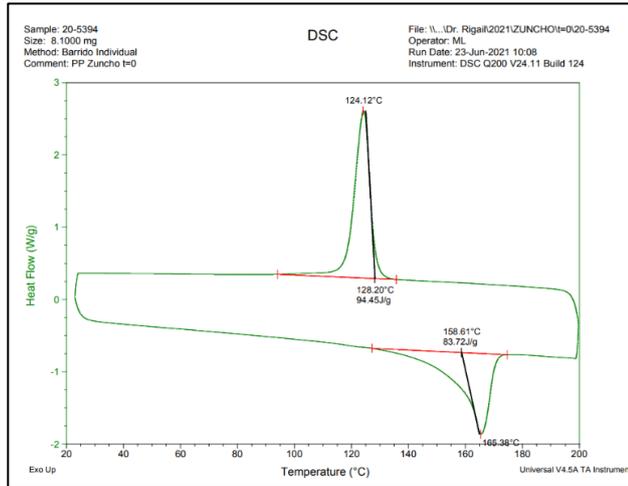
**Figura A1 DSC 205391**



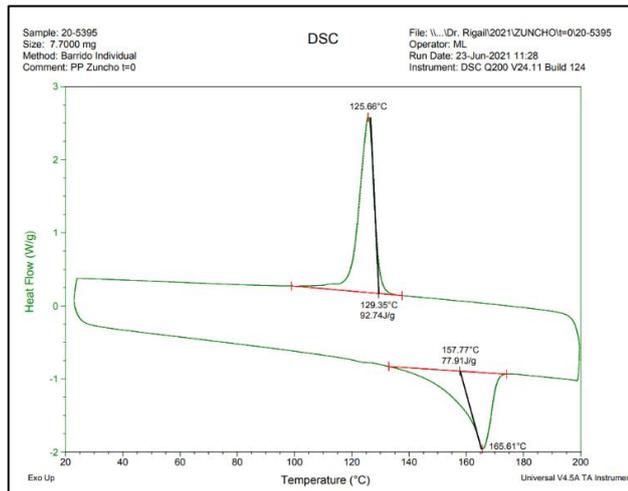
**Figura A2 DSC 205392**



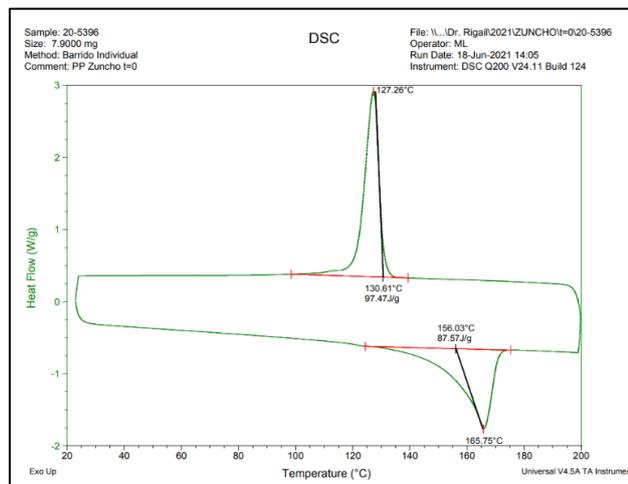
**Figura A3 DSC 205393**



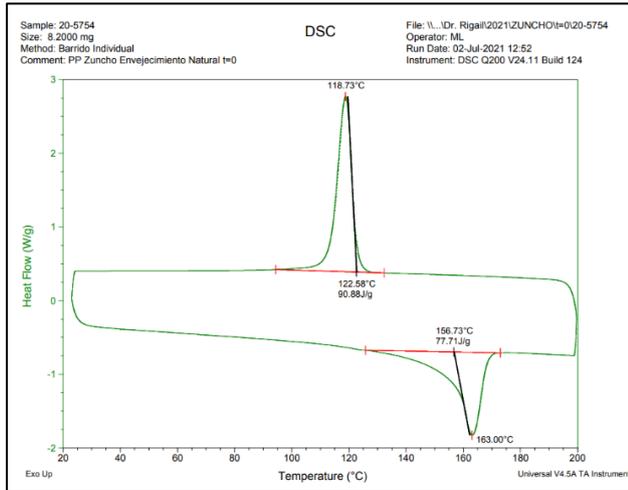
**Figura A4 DSC 205394**



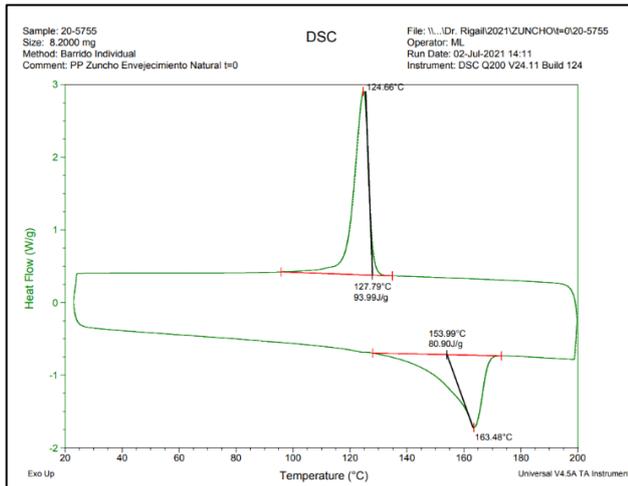
**Figura A5 DSC 205395**



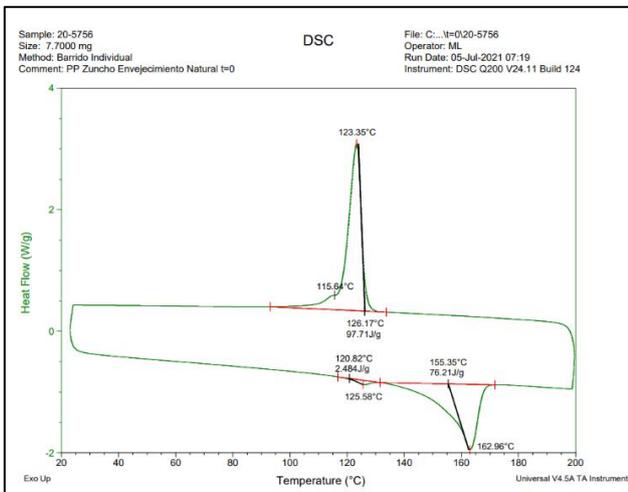
**Figura A6 DSC 205396**



**Figura A7 DSC 205754**

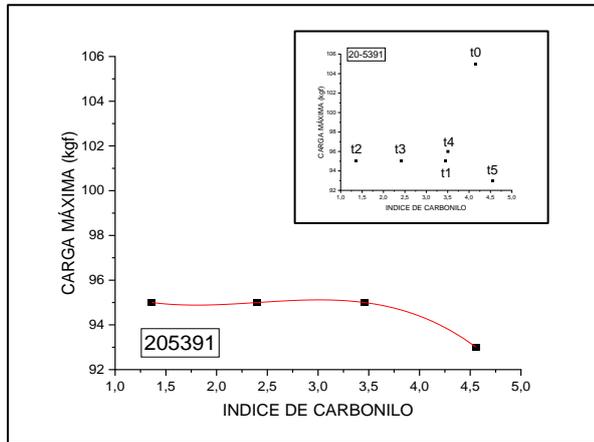


**Figura A8 DSC 205755**

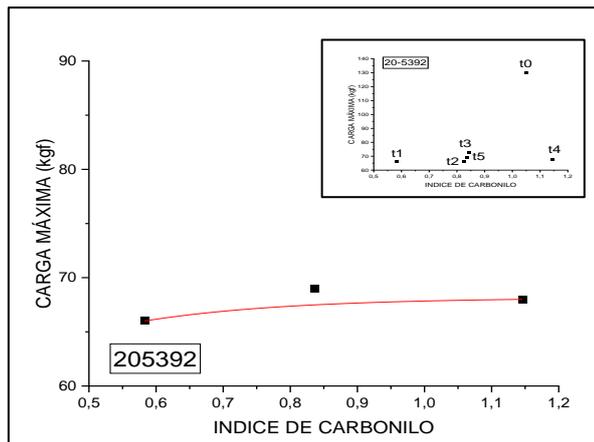


**Figura A9 DSC 205756**

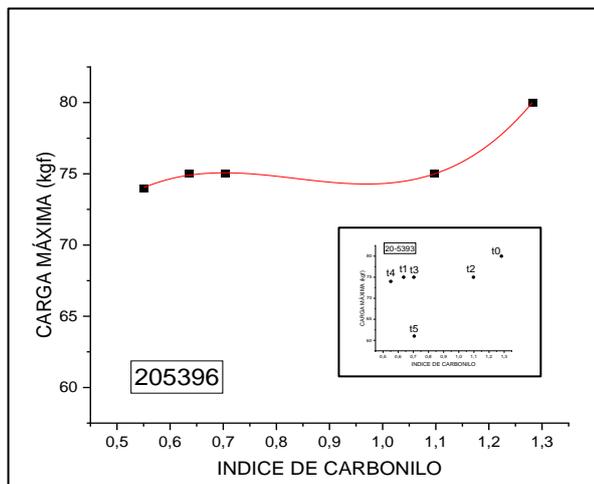
## APÉNDICE B: CORRELACION IC- CARGA MÁXIMA



**Figura B1 Correlación IC- carga máxima 205391**



**Figura B2 Correlación IC- carga máxima 205392**



**Figura B3 Correlación IC- carga máxima 205393**

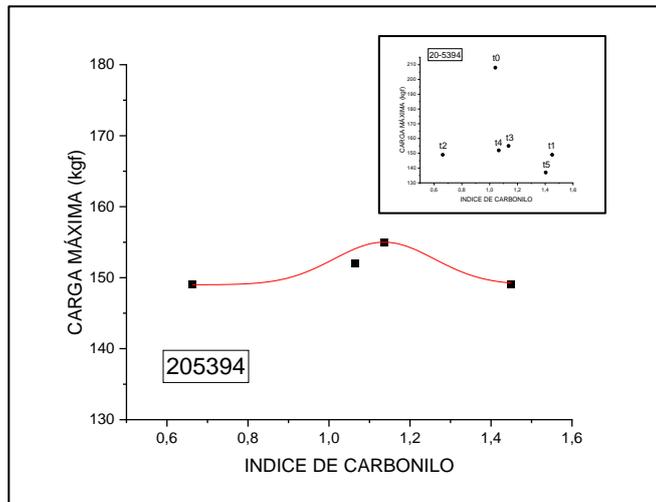


Figura B4 Correlación IC- carga máxima 205394

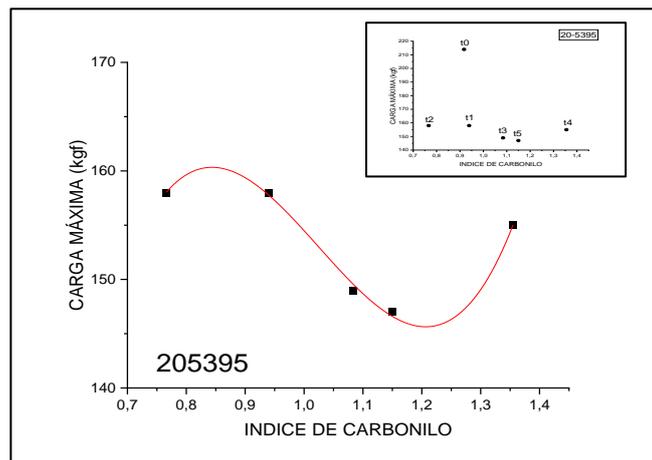


Figura B5 Correlación IC- carga máxima 205395

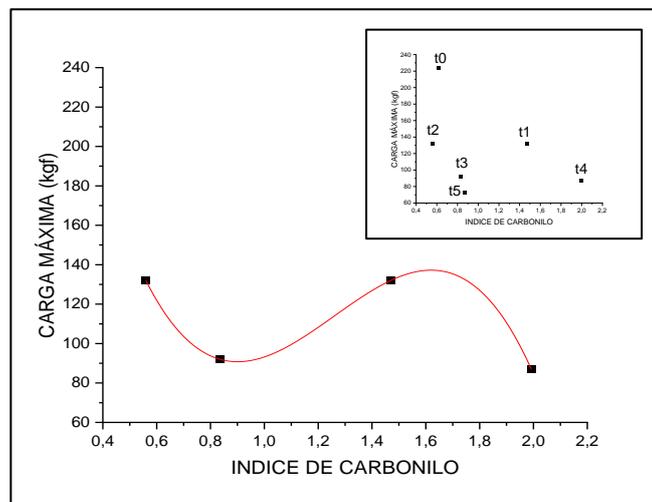


Figura B6 Correlación IC- carga máxima 205396

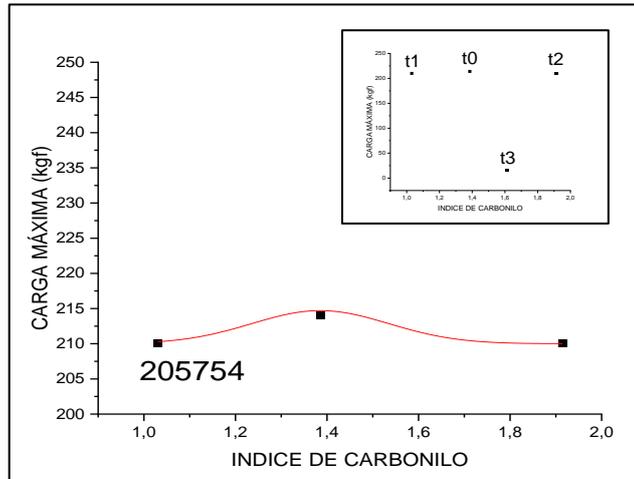


Figura B7 Correlación IC- carga máxima 205754

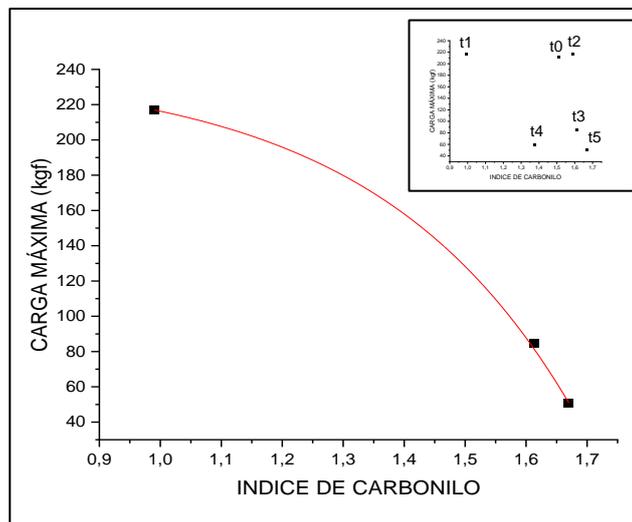


Figura B8 Correlación IC- carga máxima 205755

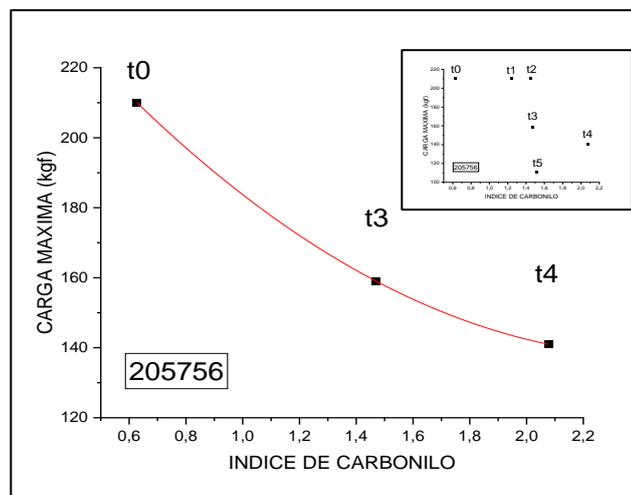


Figura B9 Correlación IC- carga máxima 205756

## APÉNDICE C: CORRELACIÓN IC- %CRISTALINIDAD

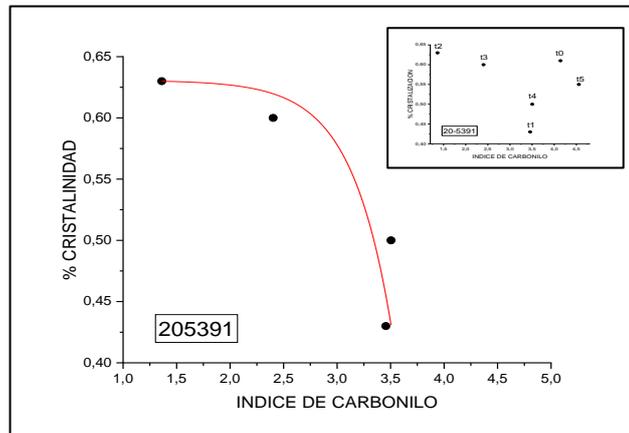


Figura C1 Correlación IC- cristalinidad 205391

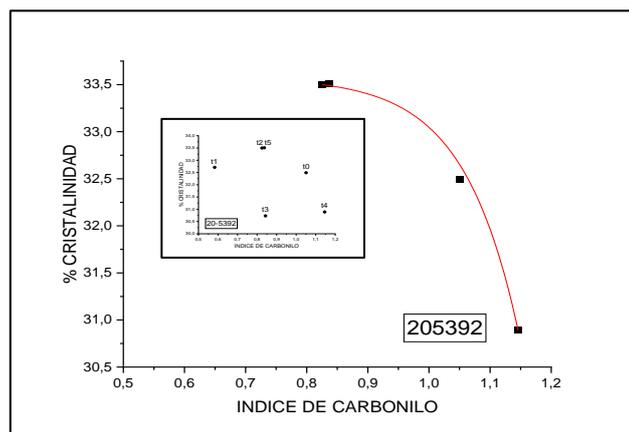


Figura C2 Correlación IC- cristalinidad 205392

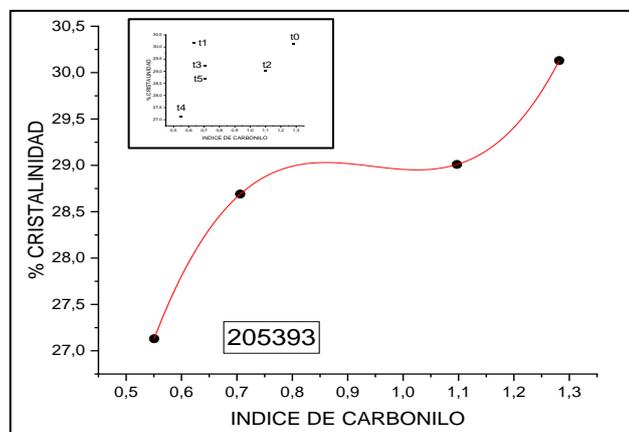


Figura C3 Correlación IC- cristalinidad 205393

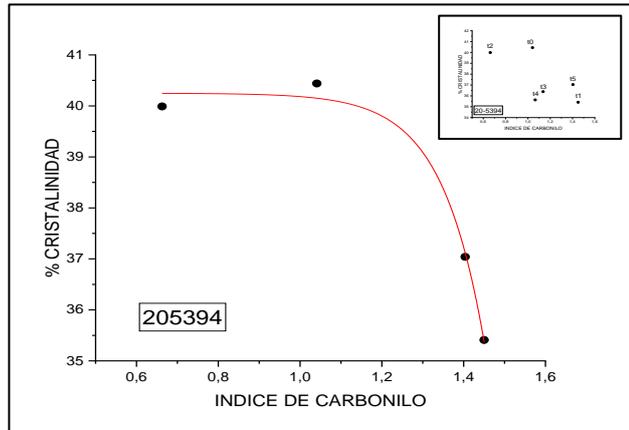


Figura C4 Correlación IC- cristalinidad 205394

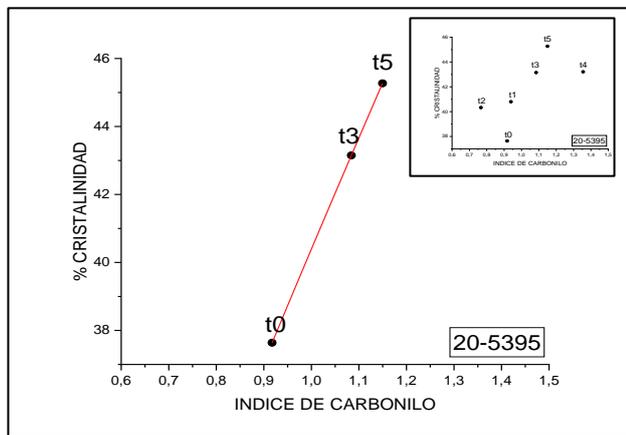


Figura C5 Correlación IC- cristalinidad 205395

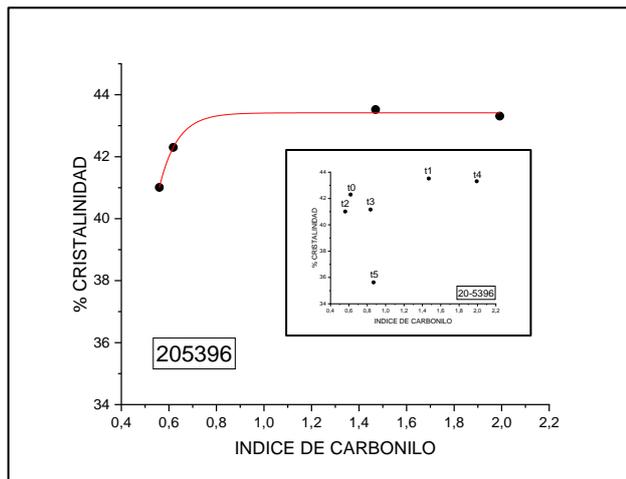


Figura C6 Correlación IC- cristalinidad 205396

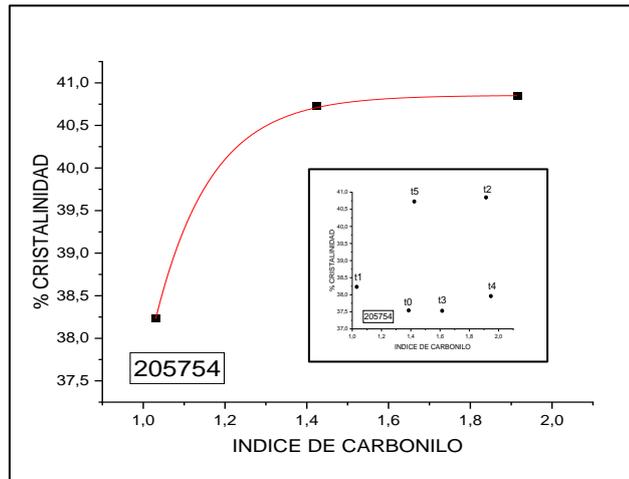


Figura C7 Correlación IC- cristalinidad 205754

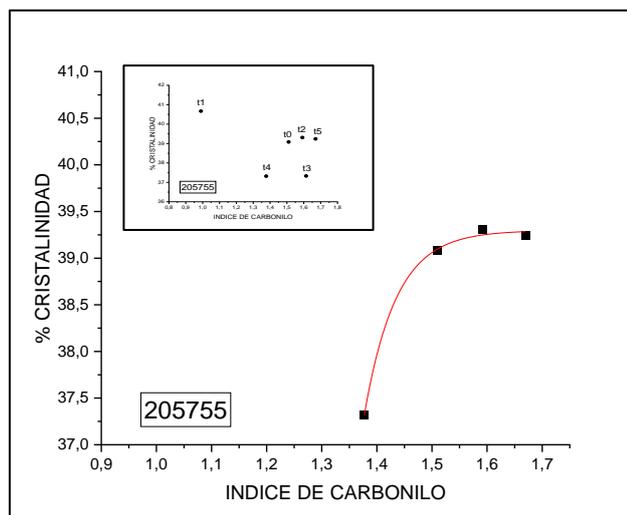


Figura C8 Correlación IC- cristalinidad 205755

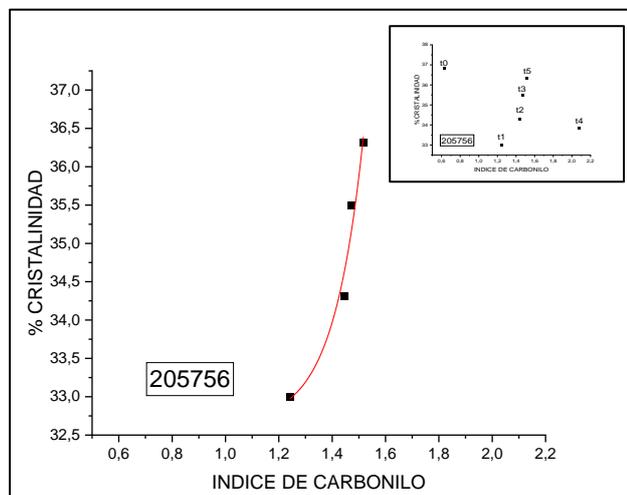
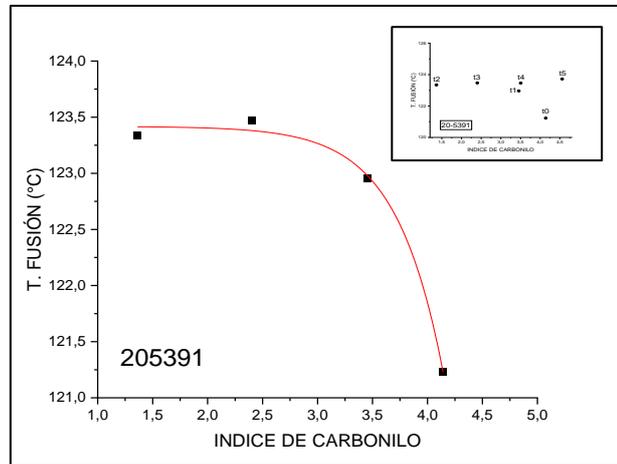
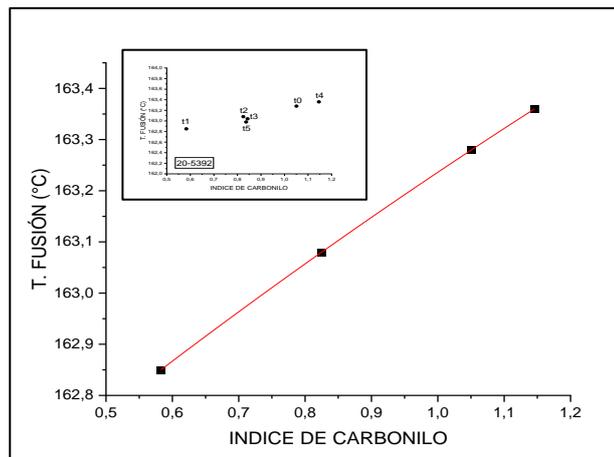


Figura C9 Correlación IC- cristalinidad 205756

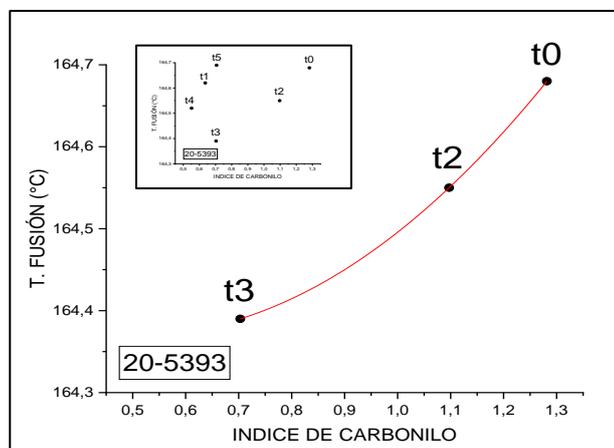
## APÉNDICE D: CORRELACIÓN IC- T. FUSIÓN



**Figura D1 Correlación IC- T. fusión 205391**



**Figura D2 Correlación IC- T. fusión 205392**



**Figura D3 Correlación IC- T. fusión 205393**

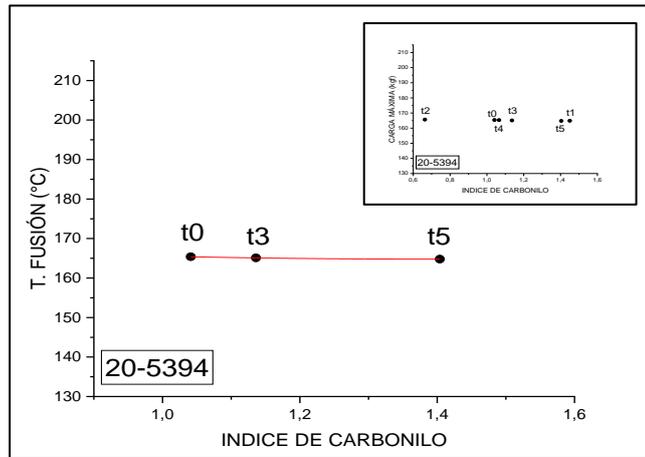


Figura D4 Correlación IC- T. fusión 205394

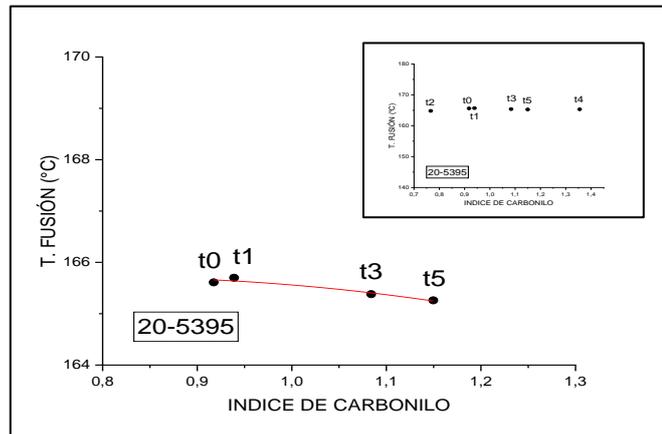


Figura D5 Correlación IC- T. fusión 205395

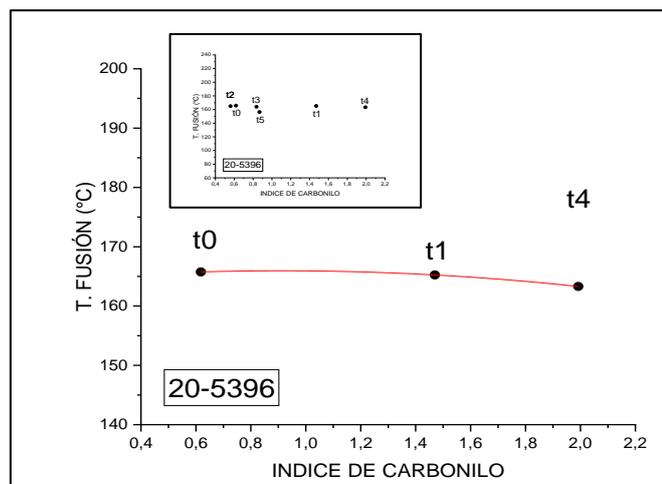


Figura D6 Correlación IC- T. fusión 205396

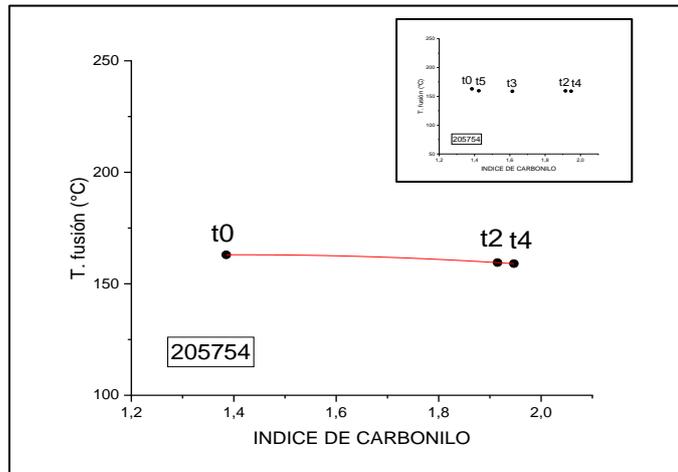


Figura D7 Correlación IC- T. fusión 205754

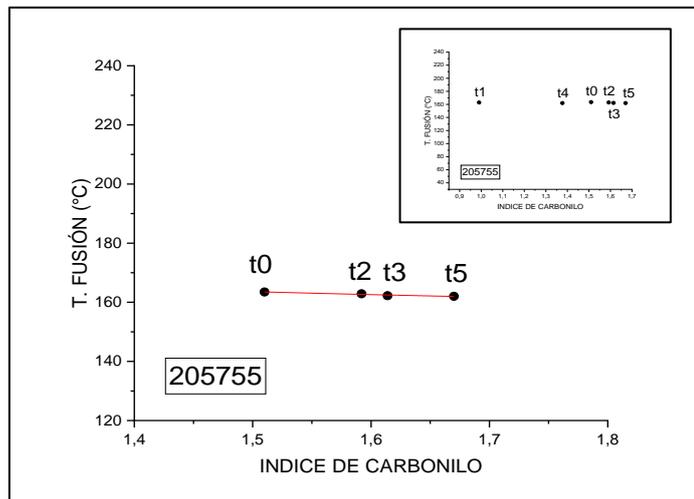


Figura D8 Correlación IC- T. fusión 205755

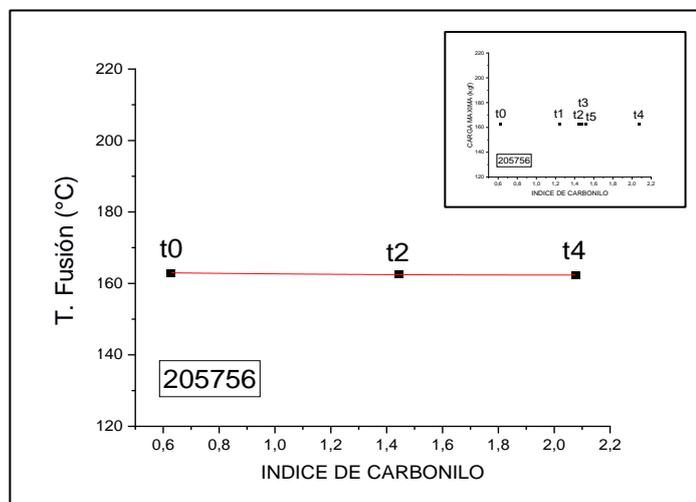


Figura D9 Correlación IC- T. fusión 205756