



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PRODUCCIÓN DE BIOPLÁSTICO A PARTIR DE ALMIDÓN DE  
SEMILLA DE AGUACATE (*Persea spp.*) REFORZADO CON  
MATERIAL LIGNOCELULÓSICO**

**TESIS presentada por:  
MARITZA ADILENNE MONTAÑEZ CERVANTES**

**A la División de Estudios de Posgrado de la  
Facultad de Ingeniería Química como  
requisito parcial para obtener el  
grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS  
EN  
INGENIERÍA QUÍMICA**

**DIRECTOR DE TESIS: Dr. Agustín Jaime Castro Montoya  
CO-DIRECTORA DE TESIS: Dra. Nancy Eloísa Rodríguez Olalde**

**Morelia, Mich.**

**Febrero 2022**

## CARTA DE ACEPTACIÓN

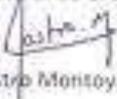


Asunto: Impresión de Tesis.

Lic. Ulises Gutiérrez Vázquez  
Jefe del Departamento de Titulación de la  
U.M.S.N.H.

Por este medio nos dirigimos a usted de la manera más atenta para notificarle, que después de haberle dado seguimiento al desarrollo de la tesis: "PRODUCCIÓN DE BIOPLASTICO A PARTIR DE ALMIDÓN DE SEMILLA DE AGUACATE (*Persea spp.*) REFORZADO CON MATERIAL LIGNOCELULÓSICO", después de haber revisado el manuscrito que presentó el alumna **Maritza Adilene Montañez Cervantes** con matrícula **1216359G** concluimos que cumple con los requisitos académicos y con lo establecido en el Reglamento General de Estudios de Posgrado para el desarrollo de su Tesis.

Por lo anterior este Comité Tutoral da el aval para su impresión final.

  
**Asesor:** Dr. Agustín Jaime Castro Montoya 01000179

  
**Co-directora:** Nancy Eloisa Rodríguez Olalde 02002582

**Vocales:**

 Dra. Ana Alejandra Vargas Tal 18701467     Dr. José María Ponce Ortega 03002829

 Dra. Ma. del Carmen Chávez Parga 07001002     MC. Gabriel Martínez Herrera 83030689

Atentamente,  
Morelia, Michoacán a 14 de febrero de 2022.

Dr. Luis Fernando Lira Barragán  
Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química.



DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO

LFLB/mcpa.



UNIVERSIDAD MICHOCÁNICA "DR. JOSÉ MARÍA PÉREZ Y GONZÁLEZ"

## RESUMEN

PRODUCCIÓN DE BIOPLÁSTICO A PARTIR DE ALMIDÓN DE SEMILLA DE AGUACATE (*Persea spp.*) REFORZADO CON MATERIAL LIGNOCELULÓSICO.

Por: Maritza Adilenne Montañez Cervantes

Febrero de 2022

Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. Agustín Jaime Castro Montoya

Co-Directora: Dra. Nancy Eloísa Rodríguez Olalde

El uso de plásticos derivados del petróleo es parte fundamental del estilo de vida actual, gracias a sus propiedades mecánicas y físico-químicas que permiten sustituir el uso de otros materiales más costosos o menos resistentes, lo que ha impulsado el desarrollo industrial y con ello la problemática ambiental. Los bioplásticos provienen de fuentes naturales como el almidón o la celulosa. Estos materiales presentan interesantes ventajas sobre los plásticos convencionales, como su bajo impacto ambiental, la disponibilidad de su materia prima, el bajo consumo de energía para su producción. Además, ayudan a agregar valor a los subproductos y residuos procedentes de desechos industriales.

Este trabajo tiene como objetivo la obtención de un bioplástico biobasado, biodegradable y compostable a partir de almidón de semilla de aguacate, residuo de la industria guacamolera. Se realizó la polimerización con agua, glicerina como agente plastificante, ácido acético como modificador químico, y los siguientes materiales de refuerzo: fibra de agave cupreata, residuo de la elaboración del mezcal y harina de semilla de aguacate. El bioplástico obtenido se ensayó con las pruebas mecánicas de resistencia a la tracción y módulo de Young, así como porcentaje de solubilidad y de absorción de agua.

Dando como resultado que, los bioplásticos reforzados con harina de la semilla de aguacate tienen diferencias significativas con respecto a los reforzados con bagazo de agave.

Palabras clave: Biopelícula, agave, amilopectina, polimerización, residuo.

## ABSTRACT

PRODUCCIÓN DE BIOPLÁSTICO A PARTIR DE ALMIDÓN DE SEMILLA DE AGUACATE (*Persea spp.*) REFORZADO CON MATERIAL LIGNOCELULÓSICO.

Por: Maritza Adilene Montañez Cervantes

Febrero de 2022

Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. Agustín Jaime Castro Montoya

Co-Directora: Dra. Nancy Eloísa Rodríguez Olalde

The use of petroleum-derived plastics is a fundamental part of today's lifestyle, due to its mechanical and physical-chemical properties that allow it to replace the use of other more expensive or less resistant materials, which has promoted industrial development and with it the environmental issues. Bioplastics come from natural sources such as starch or cellulose. These materials have interesting advantages over conventional plastics, such as their low environmental impact, the availability of their raw material, and the low energy consumption for their production. In addition, they help add value to by-products and residues from industrial waste.

The objective of this work is to obtain a biobased, biodegradable and compostable bioplastic from avocado seed starch, a residue from the guacamole industry. Polymerization was carried out with water, glycerin as a plasticizing agent, and acetic acid as a chemical modifier, and the following reinforcement materials: agave cupreata fiber, mezcal production residue, and avocado seed flour. The bioplastic obtained was tested with the mechanical tests of tensile strength and Young's modulus, as well as the percentage of solubility and water absorption.

Giving as a result that bioplastics reinforced with avocado seed flour have significant differences with respect to those reinforced with agave bagasse.

## DEDICATORIA

*Dedico el presente trabajo de investigación a mi familia y amigos, en especial a mis padres, a mi hermano y a mí misma por todo el esfuerzo, entrega, dedicación, compromiso y apoyo puesto en el cumplimiento de mis sueños y metas, tanto en el ámbito profesional como personal.*

*Maritza Adilenne Montañez Cervantes*

## ÍNDICE

<b>CARTA DE ACEPTACIÓN</b> .....	<b>ii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>xv</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>xvii</b>
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>xix</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>23</b>
<b>1.1 GENERALIDADES</b> .....	<b>24</b>
<b>1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>26</b>
<b>1.3 HIPÓTESIS</b> .....	<b>27</b>
<b>1.4 OBJETIVOS</b> .....	<b>28</b>
1.4.1 OBJETIVO GENERAL .....	28
1.4.2 OBJETIVOS PARTICULARES .....	28
<b>1.5 JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>29</b>
<b>1.6 ANTECEDENTES</b> .....	<b>30</b>
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>33</b>
<b>2.1 POLÍMEROS</b> .....	<b>34</b>
2.1.1 DEFINICIÓN Y GENERALIDADES .....	34
2.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS DE ACUERDO A SU ORIGEN .....	35
2.1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS DE ACUERDO A SUS MONÓMEROS .....	36
2.1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS DE ACUERDO A SU ESTRUCTURA QUÍMICA .....	37

2.1.5 CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS DE ACUERDO A SUS PROPIEDADES MECÁNICAS.....	39
2.1.6 REACCIONES DE POLIMERIZACIÓN.....	40
<b>2.2 PLÁSTICOS.....</b>	<b>52</b>
2.2.1 PRODUCCIÓN DE PLÁSTICOS EN EL MUNDO.....	52
2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS DE ACUERDO A SU APLICACIÓN.....	55
2.2.3 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL ASOCIADA AL USO DEL PLÁSTICO .	56
<b>2.3 BIOPLÁSTICOS .....</b>	<b>58</b>
2.3.1 BIOPLÁSTICOS BIODEGRADABLES, BIOBASADOS Y COMPOSTABLES.....	58
<b>2.4 ALMIDÓN .....</b>	<b>60</b>
<b>2.5 MATERIALES COMPUESTOS .....</b>	<b>62</b>
2.5.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS .....	62
<b>2.6 PLASTIFICANTES .....</b>	<b>65</b>
<b>2.7 AGUACATE.....</b>	<b>66</b>
<b>2.8 AGAVE CUPREATA .....</b>	<b>68</b>
<b><i>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....</i></b>	<b><i>70</i></b>
<b>3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO.....</b>	<b>71</b>
<b>3.2 OBTENCIÓN DEL ALMIDÓN.....</b>	<b>74</b>
<b>3.3 SELECCIÓN DEL MR .....</b>	<b>76</b>
<b>3.4 FORMACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS.....</b>	<b>77</b>
3.4.1 REACTIVOS .....	77
<b>3.5 CARACTERIZACIÓN .....</b>	<b>79</b>
3.5.1 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y DE SÓLIDOS TOTALES .....	79
3.5.2 DETERMINACIÓN DE CENIZAS .....	80
3.5.3 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES Y SÓLIDOS FIJOS .....	81
3.5.4 DETERMINACIÓN DE ALMIDÓN APARENTE .....	82
3.5.5 RENDIMIENTO DE LA EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN Y DE HARINA (MR) DE LA SEMILLA DE AGUACATE.....	83
3.5.6 CUANTIFICACIÓN DE LA RELACIÓN AMILOSA-AMILOPECTINA .....	84

3.5.7 TEMPERATURA DE GELATINIZACIÓN DEL ALMIDÓN.....	85
3.5.8 DETERMINACIÓN DE pH DEL ALMIDÓN .....	85
3.5.9 CANTIDAD DE AGUA FAVORABLE PARA LA FORMACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS .....	86
3.5.10 ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO (IR) .....	87
3.5.11 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS BIOPLÁSTICOS .....	87
3.5.12 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL BIOPLÁSTICO .....	88
3.5.13 MEDICIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA EN LOS BIOPLÁSTICOS	89
3.5.14 MEDICIÓN DE LA SOLUBILIDAD DE LOS BIOPLÁSTICOS.....	89
3.5.15 DEGRADACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS.....	90
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS .....</b>	<b>91</b>
<b>4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA SEMILLA DE AGUACATE.....</b>	<b>92</b>
4.1.1 CONTENIDO DE HUMEDAD, DE CENIZAS, DE SÓLIDOS TOTALES. VOLÁTILES Y FIJOS.....	92
4.1.2 DETERMINACIÓN DE ALMIDÓN APARENTE EN LA SEMILLA DE AGUACATE .....	94
<b>4.2 EXTRACCIÓN DEL ALMIDÓN.....</b>	<b>95</b>
4.2.1 BALANCE DE MASA GLOBAL Y POR PROCESO DE LA EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE LA SEMILLA DE AGUACATE .....	95
4.2.2 CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE LA EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN Y DE HARINA (MR) DE LA SEMILLA DE AGUACATE .....	97
4.2.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA EXTRACCIÓN DEL ALMIDÓN EN EL SOFTWARE STATGRAPHICS: .....	98
<b>4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA PARA LA FORMACIÓN DE BIOPLÁSTICOS .....</b>	<b>106</b>
4.3.1 CONTENIDO DE HUMEDAD, DE CENIZAS, DE SÓLIDOS TOTALES. VOLÁTILES Y FIJOS.....	106
4.3.2 DETERMINACIÓN DE ALMIDÓN APARENTE (ALMIDÓN, HARINA DE LA SEMILLA Y BAGAZO DE AGAVE).....	108
4.3.3 DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN AMILOSA/AMILOPECTINA....	110

4.3.4 DETERMINACIÓN DE pH DEL ALMIDÓN .....	111
4.3.5 ESPECTROSCOPÍA DE INFRARROJO (IR) .....	112
<b>4.4 FORMACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS .....</b>	<b>114</b>
4.4.1 TEMPERATURA DE GELATINIZACIÓN DEL ALMIDÓN.....	114
4.4.2 CANTIDAD DE AGUA FAVORABLE PARA LA FORMACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS .....	115
4.4.3 FORMACIÓN DE BIOPLÁSTICOS NO REFORZADOS.....	116
4.4.4 FORMACIÓN DE BIOPLÁSTICOS REFORZADOS .....	118
4.4.5 ENSAYOS MECÁNICOS EN LOS BIOPLÁSTICOS.....	120
4.4.6 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS BIOPLÁSTICOS.....	125
4.4.7 MEDICIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA Y DE LA SOLUBILIDAD EN AGUA DE LOS BIOPLÁSTICOS .....	126
4.4.8 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD DE LAS BIOPELÍCULAS CON MEJORES RESULTADOS .....	133
4.4.9 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE DEGRADACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS .....	134
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES .....</b>	<b>138</b>
5.1 CONCLUSIONES .....	139
5.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS A FUTURO.....	140
<b>CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>141</b>
6.1 BIBLIOGRAFÍA .....	142

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Algunos polímeros de adición tabla tomada y modificada .....	41
Tabla 2: Unión de oligómeros.....	44
Tabla 3: Estructura, propiedades y aplicaciones de termoplásticos. ....	45
Tabla 4: Estructura, propiedades y aplicaciones de elastómeros.....	49
Tabla 5: Estructura, propiedades y aplicaciones de termoestables.....	50
Tabla 6: Producción mundial de plástico de 1950 a 2019. ....	53
Tabla 7: Composición química del bagazo de agave cupreata. ....	69
Tabla 8: Caracterización de la semilla de aguacate (%). ....	92
Tabla 9: Balance del proceso de extracción de almidón a partir de semilla de aguacate.....	96
Tabla 10: Rendimiento del proceso de extracción.....	97
Tabla 11: Diseño factorial con variables codificadas y reales con el porcentaje de rendimiento como respuesta. ....	98
Tabla 12: Efectos estimados que influyen en el rendimiento (%) de la extracción.	99
Tabla 13: Análisis de varianza para el proceso de extracción del almidón de la semilla de aguacate teniendo el rendimiento (%) como variable de respuesta .....	99
Tabla 14: Coeficiente de Regresión para el Rendimiento. ....	103
Tabla 15: Respuesta optima.....	104
Tabla 16: Caracterización del almidón, de la harina y del bagazo de agave.....	107
Tabla 17: Contenido de amilosa y amilopectina en el almidón.....	110
Tabla 18: pH del almidón extraído de la semilla de aguacate. ....	111
Tabla 19: Temperatura de gelatinización del almidón .....	114
Tabla 20: Cantidad de agua favorable para la formación de bioplásticos. ....	115
Tabla 21: Condiciones para la formación de los bioplásticos. ....	116
Tabla 22: Formulaciones para biopelículas reforzadas. ....	118
Tabla 23: Ensayos mecánicos a los bioplásticos .....	120
Tabla 24: Densidad de los bioplásticos. ....	125
Tabla 25: Densidad de algunos termoplásticos.....	125
Tabla 26: Absorción de agua.....	126

Tabla 27: Contenido de humedad en los bioplásticos..... 133

## LISTA DE FIGURAS

Figura.1: Unión repetida de etileno que da lugar al polietileno.....	34
Figura 2: Formación del polipropileno .....	36
Figura 3: Formación del termopolímero propileno-etileno-1, buteno .....	36
Figura 4: Polimerización del etileno.....	40
Figura 5: Polimerización por radicales libres del poli(etilacrilato) .....	42
Figura 6: Polimerización por condensación de poli(etilenadipato).....	43
Figura 7: Producción de plástico a nivel mundial de 1950 a 2019.....	53
Figura 8: Distribución general de los polímeros .....	59
Figura 9: Estructura del almidón.....	60
Figura 10: Estructura de la amilosa.....	60
Figura 11: Estructura de la amilopectina .....	60
Figura 12: Composición de los materiales compuestos .....	62
Figura 13: Tipos de refuerzos.....	64
Figura 14: Molécula de la glicerina.....	65
Figura 15: Componentes que constituyen un aguacate .....	66
Figura 16: Composición de la semilla de aguacate .....	66
Figura 17: Penca de agave cupreata .....	68
Figura 18: Maquina de Pruebas Universales Instron 3345.....	87
Figura 19: Determinación cualitativa de la presencia de almidón en la semilla de aguacate.....	94
Figura 20: Esquema del proceso de extracción de almidón de la semilla de aguacate.....	95
Figura 21: Diagrama de Pareto del diseño factorial para la extracción de almidón de la semilla de aguacate, teniendo como respuesta el rendimiento. ....	100
Figura 22: Gráfica de Probabilidad Normal para el Rendimiento. ....	101
Figura 23: Gráfica de efectos principales. ....	102
Figura 24: Gráfica de las interacciones .....	102
Figura 25: Gráfica de Superficie de Respuesta Estimada.....	104
Figura 26: Gráfica de Contorno de la Superficie de Respuesta Estimada .....	105

Figura 27: Determinación de almidón aparente en el almidón obtenido.....	108
Figura 28: Determinación de almidón aparente en la harina de la semilla de aguacate (MR).....	109
Figura 29: Determinación de almidón aparente en el bagazo de agave (MR). ...	109
Figura 30: IR del almidón (a), de la glicerina (b) y de una muestra de biopelícula (c) .....	112
Figura 31: Pasta formada a la temperatura de gelatinización. ....	115
Figura 32: Muestra 1 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.....	117
Figura 33: Muestra 2 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.....	117
Figura 34: Muestra 3 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.....	117
Figura 35: Muestra 4 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.....	117
Figura 36: Muestra 5 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.....	117
Figura 37: Muestra 6 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.....	117
Figura 38: Muestra 7 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.....	117
Figura 39: Muestra 8 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.....	117
Figura 40: Muestra 9 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.....	117
Figura 41: Ensayo a la tracción de los bioplásticos.....	123
Figura 42: Resultados para el módulo de Young de las biopelículas. ....	124
Figura 43: Porcentaje de absorción de agua para bioplásticos no reforzados. ....	129
Figura 44: Resultados para el módulo de Young de las biopelículas. ....	130
Figura 45: Porcentaje de absorción de agua para bioplásticos reforzados con bagazo de agave.....	131

Figura 46: Solubilidad de los bioplásticos. ....	132
Figura 47: Biodegradabilidad de los bioplásticos enterrados al mes.....	135
Figura 48: Biodegradabilidad de los bioplásticos enterrados a los dos meses. ..	135
Figura 49: Biodegradabilidad de los bioplásticos enterrados a los tres meses. ..	136
Figura 50: Biodegradabilidad de los bioplásticos a la intemperie a los dos meses. .....	136
Figura 51: Biodegradabilidad de los bioplásticos a la intemperie a los cuatro meses.....	137
Figura 52: Biodegradabilidad de los bioplásticos a la intemperie a los seis meses. .....	137

## NOMENCLATURA

**ABS:** Acrilonitrilo butadieno estireno  
**ADN:** Ácido Desoxirribonucleico  
**BS:** Butadieno-estireno  
**CH<sub>4</sub>:** Metano  
**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de Carbono  
**Corr:** Corriente  
**IUPAC:** International Union of Pure and Applied Chemistry.  
**Kton:** Miles de toneladas  
**Mmdp:** Miles de millones de pesos  
**MMTon:** Millones de Toneladas Métricas  
**MR:** Material de Refuerzo  
**Mton:** Millones de toneladas  
**N<sub>2</sub>O:** Óxido nitroso  
**PA:** Poliamida  
**PAI:** Poliamida-imida  
**PAN:** Poliacrilonitrilo  
**PBT:** Politereftalato de butileno  
**PC:** Policarbonato  
**PE:** Polietileno  
**PEI:** Polieterimida  
**PPEK:** Polieter-etercetona  
**PES:** Polietersulfona  
**PET:** Politereftalato de etileno  
**pH:** Potencial de concentración de iones hidrógenos [H]<sup>+</sup>  
**PHA:** Polihidroxialcanoatos  
**PI:** Poliimidias  
**PLA:** Ácido poliláctico  
**Plástico U.S.U:** Plástico de un solo uso  
**PMMA:** Polimetacrilato de metilo

**POM:** Polioximetileno (Acetales)

**PP:** Polipropileno

**PPE:** Poliéter de fenileno

**PPS:** Sulfuro de polifenileno

**PS:** Poliestireno

**PTT:** politrimetilentereftalato

**PTFE:** Politetrafluor-etileno

**PURs:** poliuretanos

**PVC:** Policloruro de Vinilo

**PVPS:** Policloruro de vinilideno

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco primeramente a Dios por siempre brindarme los medios necesarios, ponerme en los lugares y momentos adecuados para el cumplimiento de mis metas y sueños, por poner en mi camino personas tan valiosas para acompañarme a lo largo de todo este camino.*

*Agradezco a mis padres Manuel y Rosalba por todo su apoyo y dedicación, por todas esas noches de desvelo, días de preocupación y sacrificio, por todos sus cuidados y enseñanzas que han hecho de mi hermano y de mi personas inteligentes, responsables, dedicadas, educadas y capaces de lograr sus sueños y metas.*

*Agradezco a mi hermano Manuel por su compañía, apoyo, enseñanzas, cuidados y todos los buenos y malos momentos en los que como hermanos hemos estado juntos y hemos logrado salir adelante, por hacer mis días más divertidos.*

*Agradezco a mi familia, en especial a mi abuelita María de la Luz, a mis tías Marbella (Q.E.P.D.) y Alejandra y a mi prima Valeria, por sus cuidados, cariño, compañía, apoyo y comprensión a lo largo de la realización de este proyecto y de mi vida en general.*

*Agradezco a mis compañeros (Ana Karen, Sandra, Fernando y Juan Pablo) por su apoyo tanto profesional como personal, por todos esos días y noches enteras que nos acompañamos y ayudamos estudiando para sacar adelante nuestras materias y proyectos.*

*Agradezco a mis amigos que han hecho más ameno y divertido todo este camino por su confianza y el estar siempre pendiente de mi bienestar, físico, emocional y sentimental, agradezco su apoyo en cada una de mis locuras y en la realización de todas y cada una de mis metas.*

*Agradezco a mi asesor el Dr. Agustín, mi co-asesora la Dra. Nancy, a la Dra. Ana Alejandra, la Dra. María del Carmen, al Dr. José María, así como al resto de doctores y personal administrativo que conforman la División de Estudios de Posgrado y al Dr. Rubén González del CUCEI por la confianza brindada, apoyo, disponibilidad y herramientas proporcionadas para la realización de este proyecto, así como sus buenos consejos.*

*Agradezco a la universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a la Facultad de Ingeniería Química y a la División de Estudios de Posgrado por proporcionarme la oportunidad de poder formar día con día mi vida profesional dentro de sus instalaciones con personal docente y administrativo de total excelencia.*

*Agradezco a CONACYT por el apoyo económico proporcionado para la realización de este proyecto de investigación.*

*Maritza Adilenne Montañez Cervantes*

## GLOSARIO

**Aislamiento:** Que impide la transmisión de algo, ya sea la electricidad, la humedad u otra cosa.

**Anión:** Ion que tiene carga negativa y procede de un elemento negativo.

**Baya:** Fruto carnoso o pulposo con varias semillas en su interior que están envueltas directamente por la pulpa; suele tener forma redondeada o elipsoidal.

**Biodegradable:** Producto o sustancia que puede descomponerse en los elementos químicos que lo conforman, debido a la acción de agentes biológicos, como plantas, animales, microorganismos y hongos, bajo condiciones ambientales naturales.

**Biomasa:** Cantidad de productos obtenidos por fotosíntesis, susceptibles de ser transformados en combustible útil para el hombre y expresada en unidades de superficie y de volumen.

**Bioplástico:** También llamados plásticos orgánicos. Son una forma de plásticos derivados de fuentes renovables de biomasa, como el aceite vegetal, el almidón de maíz, el almidón de guisantes o microbiota, en lugar de plástico de los combustibles fósiles, que son derivados del petróleo.

**Biopolímeros:** Sustancias poliméricas naturales. Son especies químicas de alto peso molecular, gran tamaño y forma predominantemente alargada.

**Carcinógenos:** Sustancia o agente que produce cáncer o puede favorecer su aparición.

**Catión:** Ion que tiene carga positiva y procede de un elemento electropositivo.

**Compostable:** Material que se degrada biológicamente produciendo dióxido de carbono, agua, compuestos inorgánicos y biomasa a la misma velocidad que el resto de materia orgánica que se está compostando con éste, sin dejar residuos tóxicos visibles o distinguibles.

**Distorsión:** Puede definirse como la "deformación" que sufre una señal tras su paso por un sistema.

**Dureza:** Grado de resistencia que opone un mineral a ser rayado por otro.

**Elasticidad:** Propiedad de un cuerpo sólido para recuperar su forma cuando cesa la fuerza que la altera.

**Extrusión:** Proceso utilizado para crear objetos con sección transversal definida y fija, en donde el material se empuja o se extrae a través de un troquel de una sección transversal deseada.

**Fragilidad:** Facilidad de una cosa para romperse.

**Fuentes renovables:** Son aquellas que, tras ser utilizadas, se pueden regenerar de manera natural o artificial.

**Homogéneo:** Material formado por elementos con características comunes referidas a su clase o naturaleza, lo que permite establecer entre ellos una relación de semejanza y uniformidad.

**Impermeable:** Material que no permite el paso de la humedad, el agua u otro líquido.

**Incineración:** Combustión completa de la materia orgánica hasta su conversión en ceniza, usada en el tratamiento de basuras: residuos sólidos urbanos, industriales peligrosos y hospitalarios, entre otros.

**Inyección:** Procedimiento de moldeo de una materia plástica que consiste en la fusión previa del material que después se inyecta dentro de un molde.

**Lanceolado:** Que tiene la forma de una punta de lanza.

**Macroplásticos:** Plástico de gran tamaño.

**Maleabilidad:** Cualidad de maleable.

**Meros:** Una unidad que se repite a lo largo de una cadena. Es la unidad más pequeña que se repite en la estructura de un plástico.

**Microplásticos:** Se trata de pequeñas partículas sintéticas (de tamaño menor a 5 mm) que provienen de derivados del petróleo.

**Nanoplásticos:** Partículas de plástico de menos de 1  $\mu\text{m}$ .

**Oligómeros:** Cadenas cortas de monómeros.

**Opacidad:** Falta de claridad o transparencia.

**Polimerización:** Proceso mediante el cual las moléculas simples, iguales o diferentes, reaccionan entre sí por adición o condensación y forman otras moléculas de peso doble, triple, etc.

**Polímero:** Macromoléculas formadas por la unión mediante enlaces covalentes de una o más unidades simples llamadas monómeros repetidas a lo largo de una cadena.

**Propiedades físicas:** Son aquellas que se pueden medir, sin que se afecte la composición o identidad de la sustancia.

**Propiedades químicas:** Se observan cuando una sustancia sufre un cambio químico, es decir, en su estructura interna, transformándose en otra sustancia, dichos cambios químicos, son generalmente irreversibles.

**Radical:** Un radical es una molécula (orgánica o inorgánica), en general extremadamente inestable y, por tanto, con gran poder reactivo.

**Reacción química:** Proceso químico en el cual dos sustancias o más, denominados reactivos, por la acción de un factor energético, se convierten en otras sustancias designadas como productos.

**Reciclable:** Material o producto que se puede reciclar.

**Reciclar:** Someter a los materiales usados o desperdicios a un proceso de transformación o aprovechamiento para que puedan ser nuevamente utilizados.

**Reflectancia:** Capacidad de un cuerpo de reflejar la luz.

**Rizomas:** Tallos subterráneos desprovistos de hojas, pero pueden poseer catafilos en forma de membranas escamosas.

**Soplado:** Proceso utilizado para fabricar piezas de plástico huecas gracias a la expansión del material.

**Translucidez:** Cualidad de traslúcido.

**Transparencia:** Cualidad que tienen algunos objetos o materias a través de los cuales pasa la luz y se puede ver.

# **CAPÍTULO 1:**

## **INTRODUCCIÓN**

---

En este capítulo se expondrán las generalidades, los objetivos, tanto general como particulares, la justificación, el planteamiento del problema, la hipótesis y los antecedentes que inspiraron la realización de este proyecto de investigación.

## 1.1 GENERALIDADES

Los polímeros son macromoléculas formadas por varias unidades monoméricas de una o más especies de átomos o grupos de ellos que se repiten para formar una cadena larga, unidos mediante enlaces covalentes (Castro Pérez, 2020). Existen distintas formas de clasificar a los polímeros, entre ellas por su origen, los cuales pueden ser naturales, sintéticos y semisintéticos. Los polímeros naturales o biopolímeros provienen de animales marinos, vegetales o bacterias (Labeaga Viteri, 2018), por otro lado, los polímeros semisintéticos son polímeros naturales, sometidos a una transformación generada por el hombre, es decir, son la mezcla de polímeros sintéticos y naturales (Cornejo Arteaga, 2016), mientras que, los polímeros sintéticos se obtienen generalmente del petróleo y se utilizan para la fabricación de plásticos (DOW, s.f.) debido a que ofrecen productos de bajo costo, excelente estabilidad térmica y fácil procesamiento, lo que genera plásticos de un solo uso, en la mayoría de las veces, posteriormente convertidos en desechos, además, existe la preocupación sobre el suministro inestable y agotamiento de los recursos fósiles (Ojogbo y Col., 2020), por otro lado, cuando se habla de contaminantes plásticos no solo se refiere a los desechos plásticos de gran tamaño, también incluye a los microplásticos, los cuales se han convertido en la mayor preocupación, dado que se encuentran dispersos en el medioambiente (Sarria-Villa & Gallo-Corredor, 2016), los cuales no solo tienen consecuencias ambientales, también tienen un impacto directo sobre los seres vivos, ya sea por toxicidad o ingestión (Bollaín Pastor & Vicente Agulló, 2020). Debido a lo anterior, existe un creciente interés en la investigación de obtención de materiales poliméricos a base de materias primas naturales como lignina, celulosa, hemicelulosa, almidón, proteínas, lípidos, entre otros, ya que son susceptibles al ataque microbiano y, por lo tanto, su biodegradación y eliminación es segura (Ojogbo, Ogunsona, & Mekonnen, 2020). Los biopolímeros pueden procesarse mediante las mismas tecnologías que los polímeros convencionales como soplado, inyección, extrusión, compresión, termoformado y recubrimiento por extrusión de fibras y tejidos, por lo que no son necesarios grandes cambios tecnológicos (Morales Segura, 2018).

El almidón es el polisacárido más importante (Agarwal, 2021), es un polímero natural de reserva y el encargado de proveer energía a los organismos como los animales y las plantas (Liera R. F. J., 2017), gracias a su origen (fuentes renovables), abundancia, rentabilidad y propiedades es altamente utilizado en la producción de películas (Agarwal, 2021), ya sea como matriz polimérica en forma de almidón termoplástico o como nanocarga en forma de nanocristales (Avellán, y Col., 2020). Un buen plastificante y el más utilizado para el almidón es la glicerina, la cual además de ayudar en el proceso de la polimerización ayuda a dar suavidad al termoplástico (Heydari y col., 2013).

Por otro lado, podemos encontrar materiales compuestos de una matriz polimérica, estos materiales constan de un polímero reforzado con algún tipo de fibra (Greenpeace, 2019), partícula u hojuela (Mauricio, 2018), lo cual proporciona nuevas y superiores propiedades físicas y mecánicas (Greenpeace, 2019). En este trabajo se propone la creación de un bioplástico obtenido a base de almidón de la semilla de aguacate, añadiendo material lignocelulósico como material de refuerzo (MR) y polimerizado con glicerol y ácido acético como modificador químico.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los plásticos que se obtienen de compuestos a base del petróleo, son productos que para su total eliminación requieren que pasen largos periodos de tiempo. Debido a lo antes mencionado, este proyecto de investigación tiene como finalidad proponer una alternativa de solución para la reducción del problema ambiental generado por la basura plástica fósil con la obtención de un bioplástico a base de almidón de la semilla de aguacate, plastificante y adicionando material lignocelulósico como refuerzo con características similares a la de los termoplásticos, con la ventaja de tener un impacto ambiental prácticamente nulo, proporcionando valor agregado al desecho proveniente de otros procesos, en este caso la semilla de aguacate residuo de la industria guacamolera, así como el bagazo de agave cupreata de la elaboración de mezcal.

### **1.3 HIPÓTESIS**

Si se modifica la relación almidón-material de refuerzo (MR) y relación almidón-agente plastificante al sintetizar un bioplástico a partir de almidón proveniente de la semilla de aguacate y material de refuerzo, a través del método de polimerización por condensación, es posible obtener un plástico biodegradable y compostable.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Producir un bioplástico a base de almidón de la semilla del aguacate, plastificante y MR, por el método de polimerización por condensación y modificando la relación almidón-MR y relación almidón-agente plastificante.

### **1.4.2 OBJETIVOS PARTICULARES**

- Evaluar el uso de desecho agroindustrial proveniente de otros procesos para la formación de bioplásticos.
- Definir las mejores condiciones para la obtención del almidón de acuerdo al rendimiento.
- Seleccionar el material de refuerzo (MR) para producir el bioplástico de acuerdo a su tamaño y disponibilidad.
- Determinar la formulación para la fabricación del bioplástico que proporcione propiedades mecánicas significativas.
- Comparar las relaciones óptimas de almidón-MR-agente plastificante que proporcionen las mejores propiedades mecánicas al bioplástico.
- Evaluar las propiedades mecánicas y el tiempo de degradación de los bioplásticos.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

En la presente investigación se plantea el aprovechamiento de residuos agroindustriales provenientes de otros procesos para producir un plástico biodegradable y compostable a base de almidón de la semilla del aguacate, plastificante y material de refuerzo (harina de la semilla de aguacate y bagazo de agave), proporcionando una alternativa de solución al problema ambiental creado por los desechos generados por plástico convencional de un solo uso. Es importante mencionar que, en la mayoría de las investigaciones reportadas, el almidón se obtiene a partir de fuentes alimenticias, lo que incrementa su costo de producción debido a que se requiere la compra de materia prima y, siendo Michoacán el principal estado productor de aguacate y el tercer productor de agave cupreata (mezcalero) en México la obtención de la materia prima resulta accesible.

## 1.6 ANTECEDENTES

A continuación se mencionan investigaciones relacionadas con el presente trabajo.

Gaitán Camacho (2009) en su tesis **“Obtención, caracterización y comparación de almidón termoplástico a partir de almidón de yuca y maíz”** realizó biopolímeros a partir de almidón de maíz y de yuca empleando glicerina como plastificante, para lo cual se llevó a cabo la caracterización de los almidones empleados.

García Quiñones (2015) en su tesis **“Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz.”** obtiene un polímero biodegradable a partir del almidón de maíz, al que se le realiza un proceso de polimerización con agua y glicerina como plastificantes y ácido acético como modificador químico de acuerdo a las siguientes cantidades: 10 g de almidón de maíz, 5 mL de ácido acético y 3 mL de glicerina. Dando como resultado un material débil a la resistencia a la tensión, tal motivo limita sus aplicaciones, siendo apto para ser utilizado como material de empaque si este no se expone a altas temperaturas.

Chel-Guerrero y col. (2016) realizaron un artículo titulado **“Some physicochemical and rheological properties of starch isolated from avocado seeds”** donde utilizaron dos solventes distintos para aislar el almidón de la semilla de aguacate además, evaluaron las características funcionales y reológicas de estos almidones, dando como resultado que el solvente utilizado no influye en las propiedades del almidón reportadas, las cuales fueron que el contenido de amilosa es del 15 al 16 %, el rango de temperatura de gelatinización fue de 56 a 74 °C, la temperatura máxima fue de 65.7 °C, la entalpía de transición de 11.4 – 11.6 J/g, además, a 90 °C, la solubilidad fue del 19 al 20 %, el poder de hinchamiento de 28 a 30 g de agua / g de almidón y agua y la capacidad de absorción fue de 22 a 24 g de agua / g de almidón. Por otro lado, mencionan que la composición proximal del almidón de la

semilla de aguacate (base húmeda) es agua de 51–58%; almidón 29%; azúcares 2,21-3,50%, principalmente arabinosa 2,04-2,15%; proteína 2,38-2,45% y ceniza 1,24–1,34%.

Uc León (2017) en su tesis “**Caracterización de los productos obtenidos del proceso de pirólisis de residuos lignocelulósicos de agave y su uso como fuente de energía**” evaluó el uso del agave cupreata como fuente para la producción de carbón bioaceite y gas de síntesis, mediante el proceso de pirólisis, para lo cual, se determinó la composición química y reologica del bagazo de agave y su degradación térmica, obteniendo un 16.7 % de extraíbles totales, 17.8 % de lignina, 65 % de holocelulosa (celulosa y hemicelulosa), 7.75 % de cenizas en peso y 8.62 % de humedad.

Gonzáles García (2018) en su tesis de doctorado “**Desarrollo de un polímero biodegradable a partir de almidón de semilla de ataco, *Amaranthus quitensis L.***” obtuvo almidón de las semillas de ataco, con el cual elaboró un polímero biodegradable al que se le midieron sus propiedades físico-mecánicas, así como su estabilidad frente al agua y a gradientes de temperatura, por otro lado, también se realizó un análisis de las propiedades del almidón como los índices de absorción de agua y de solubilidad, el contenido de amilosa y de amilopectina y la temperatura de gelatinización.

Avila Rodriguez & Guerrero López (2019) en su tesis “**Obtención de un conservante natural a partir de la semilla de aguacate variedad Hass (Persea Americana Mill.)**” obtuvieron un conservante a partir de la semilla de aguacate, con el fin de utilizarlo en la industria alimentaria, como parte de la caracterización de la semilla se midió el contenido de humedad y de cenizas de la misma, dando como resultado  $56.32 \pm 0.3$  % y  $1.666 \pm 4.032$  respectivamente.

Halimatul, Sapuan, Jawaid, Ishak, & Ilyas (2019) en su artículo “**Water absorption and water solubility properties of sago starch biopolymer composite films filled with sugar palm particles**” midieron la absorción de agua y la solubilidad en agua en biopelículas termoplásticas compuestas de almidón de sagú, adicionadas

con 10, 20, 30, 40 y 50 % en peso de partículas de azúcar de palma, dando como resultado que dichas partículas reducen la absorción de agua, aumentando las propiedades de barrera del biopolímero, obteniendo así, biopelículas más duraderas.

Sánchez Banda (2019) es su tesis **“Propiedades químicas, morfológicas y funcionales de almidón de semilla de palta (*Persea americana Mill.*) CV fuerte”** evaluó las propiedades químicas, morfológicas y funcionales del almidón de la semilla de aguacate, entre ellas las propiedades para la formación de pastas, dando como resultado que la temperatura de empastado o gelatinización es de 85 °C.

Orrego C. y col. (2020) en su informe **“Productividad y Competitividad Frutícula Andina”** muestran distintas maneras en las que se pueden aprovechar los residuos agrícolas de distintas frutas como maracuya, aguacate y plátano, entre las aplicaciones descritas se menciona la extracción de almidón de la semilla de aguacate, el cual se caracterizó en terminos de humedad, temperatura de gelatinización, índice de absorción de agua, índice de solubilidad en agua, % de amilosa y amilopectina y el rendimiento de la extracción.

Tarique, J. y col. (2021) en su artículo **“Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers”** desarrollaron y analizaron las propiedades físicas, estructurales, mecánicas, térmicas, ambientales y de barrera de películas elaboradas con almidón de arrurruz y glicerol como plastificante en una proporción de 15, 30 y 45 % (p / p, base de almidón), dando como resultado que la incorporación de plastificante redujo la fragilidad, la densidad y la absorción de agua, e incrementó el espesor, el contenido de humedad y la solubilidad en agua de las películas, por otro lado, la resistencia a la tracción y el módulo de las películas plastificadas se redujeron significativamente, mientras que el alargamiento a la rotura aumentó.

# **CAPÍTULO 2:**

## **MARCO TEÓRICO**

---

En este capítulo se muestran conceptos relacionados con los materiales poliméricos, como la definición y generalidades de los polímeros, su clasificación de acuerdo a distintos criterios, sus propiedades mecánicas y a su aplicación final, también se detallan los conceptos de homopolímero y copolímero, se mencionan los tipos de reacciones de polimerización empleadas para la obtención de los mismos, así como sus principales usos, además, se aborda el tema de los plásticos, su clasificación y la problemática medioambiental que causa su fabricación y utilización, de acuerdo a la problemática antes mencionada se aborda el tema de los bioplásticos biodegradables y biobasados con un análisis centrado en los obtenidos a base de almidón, posteriormente, se aborda el tema de los materiales compuestos, más específicamente de los materiales compuestos de matriz polimérica y por último pero no por ello menos importante se habla de los materiales utilizados en este proyecto como el aguacate, la glicerina como plastificante y el agave cupreata.

## 2.1 POLÍMEROS

### 2.1.1 DEFINICIÓN Y GENERALIDADES

La ciencia de los polímeros se ha ido desarrollando desde la tercera década del siglo XX (Galego-Fernández & Rozsa-Galego, 2018), con la investigación de las propiedades del polímero natural hule (Castro Pérez, 2020). En un inicio, el uso de materiales poliméricos tenía la finalidad de reemplazar materiales de origen animal utilizados en la fabricación de distintos objetos (Martins S., 2018), sin embargo, actualmente, la producción en masa de polímeros excede la producción conjunta de acero y aluminio (Taverna, 2018).

La palabra polímero proviene del griego, *poli*, que significa muchos, y *meros*, que significa partes, segmento o unidad (Alexandrova, 2003). Los polímeros son macromoléculas de peso molecular alto, compuestas por una o más unidades básicas conocidas como monómeros, repetidas continuamente y unidas entre ellas mediante enlaces químicos covalentes (Schwarz, 2020).

Los monómeros forman cadenas largas unidas por fuerzas de Van der Waals, interacciones hidrofóbicas o puentes de hidrogeno (Liera R. F. J., 2017). Al proceso mediante el cual se forman los polímeros se le denomina reacción de polimerización y el grado de polimerización habla del número de meros presentes en una cadena de polímeros (Polyexcel , 2020), en la figura 1 se esquematiza la formación del polietileno mediante la unión repetida del monómero etileno, cabe mencionar que las propiedades de los polímeros son muy diferentes de las propiedades de los monómeros que los forman; por ejemplo, el etileno es un gas, mientras que el polietileno es un sólido (Alexandrova, 2003).

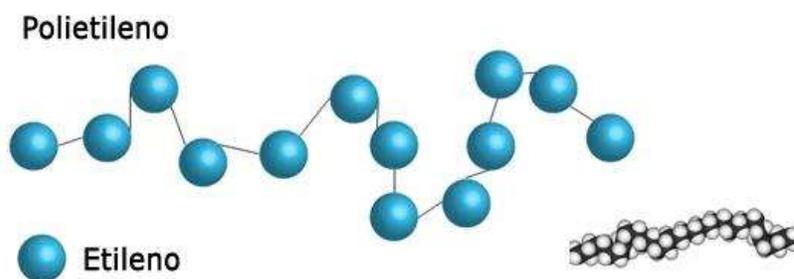


Figura. 1: Unión repetida de etileno que da lugar al polietileno (Curiosoando.com, 2019).

## **2.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS DE ACUERDO A SU ORIGEN**

Los polímeros pueden clasificarse de acuerdo a su origen en naturales, sintéticos y semisintéticos, dicha clasificación se abordará a continuación.

### **2.1.2.1 Polímeros naturales**

Los polímeros naturales son todos aquellos presentes en la naturaleza (Polyexcel , 2020), ya sea de origen vegetal, animal o sintetizado por bacterias (Gaitán Camacho, 2009). Estos materiales comenzaron a utilizarse gracias a sus propiedades químicas, mucho antes de su surgimiento y entendimiento en el laboratorio, como ejemplo se pueden encontrar las proteínas como las uñas y el cabello, la celulosa, los almidones, el ADN, la brea, la seda, la lana, el lino, el cuero, el caucho natural y la laca (Greelane.com, 2019).

### **2.1.2.2 Polímeros sintéticos o artificiales**

Son polímeros creados artificialmente a base de productos petroquímicos o siliconas (Posada Bustamante, 2012), fueron fabricados para la sustitución de polímeros naturales, como el caucho y la seda, ejemplos de ellos son el neopreno, el nylon, poliéster, el polietileno, el poliestireno, el teflón, la silicona, entre otros (Greelane.com, 2019). Pero el primer polímero sintético en su totalidad fue la Baquelita, elaborado por Leo Hendrik Baekeland (Liera R. F. J., 2017). Este tipo de materiales poseen la ventaja de poder diseñarse a medida y adaptar sus propiedades a necesidades específicas (Luna, 2018).

### **2.1.2.3 Polímeros semisintéticos**

Son polímeros formados por una reacción polimérica en donde se fusionan polímeros aislados de origen natural con materiales sintéticos (Huda, Rahmi, & Khairan, 2019). El primer polímero semisintético fue el vulcanizado del caucho, elaborado por Charles Goodyear en 1839 (Liera R. F. J., 2017).

### 2.1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS DE ACUERDO A SUS MONÓMEROS

Otra clasificación importante es de acuerdo a sus monómeros, en la que se encuentran los homopolímeros y los copolímeros.

#### 2.1.3.1 Homopolímeros

Polímeros conformados a partir de la repetición de una sola unidad monomérica (Bolaños & Alvarez, 2018) en la cadena (cadena homogénea), como ejemplos se encuentran el poliestireno proveniente del monómero estireno, el PVC, que consta de la repetición de unidades de cloruro de vinilo o el polipropileno con unidades repetidas de propileno (YuBrain, 2021) mostrado en la figura 2.

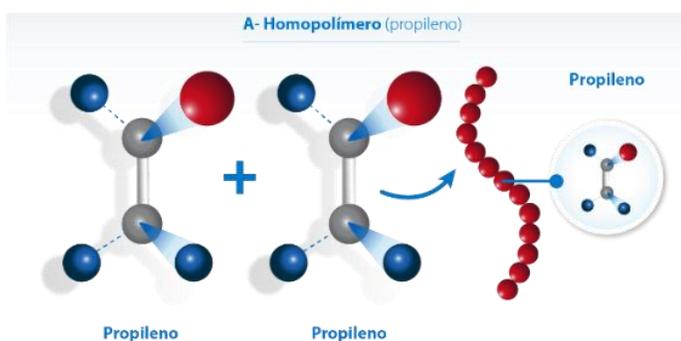


Figura 2: Formación del polipropileno (Petrocuyo.com, 2020).

#### 2.1.3.2 Copolímeros

Proviene de la formación de un polímero con más de una unidad repetitiva (generalmente dos o tres monómeros) (Alexandrova, 2003). La copolimerización sirve para modificar polímeros y darle propiedades específicas (Gutiérrez Valencia y col., 2019). Los más famosos son los plásticos ABS, constituidos de acrilonitrilo, butadieno y estireno (Alexandrova, 2003) o los termopolímeros formados por propileno, etileno y buteno (Petrocuyo.com, 2020) mostrado en la figura 3.

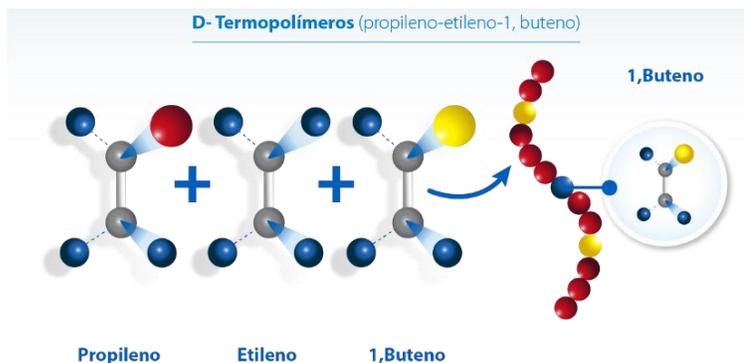


Figura 3: Formación del termopolímero propileno-etileno-1, buteno (Petrocuyo.com, 2020).

## **2.1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS DE ACUERDO A SU ESTRUCTURA QUÍMICA**

Por otro lado, los polímeros se pueden clasificar de acuerdo a su estructura química en polímeros lineales o termoplásticos, polímeros lineales entrecruzados o elastómeros y polímeros tridimensionales o termoestables.

### **2.1.4.1 Termoplásticos**

Los termoplásticos, son usualmente conocidos como plásticos, estos pueden ser polímeros lineales o ramificados (Castro Pérez, 2020) unidos mediante enlaces secundarios (Fombuena Borrás y col., 2016), son materiales con la capacidad de fluir y ablandarse al aplicarles calor y presión, así los termoplásticos se pueden moldear y remodelar varias veces, limitados únicamente por su degradación química (Posada Bustamante, 2012) o temperatura de degradación, en la cual los enlaces covalentes de la cadena principal se destruyen y el polímero se quema o carboniza (Universidad Politécnica de Valencia, 2020) con la desventaja de sufrir distorsión (Posada Bustamante, 2012).

Dentro de los termoplásticos se encuentran los amorfos y los semicristalinos, en los primeros las cadenas secundarias se encuentran totalmente desordenadas, mientras que en los segundos las cadenas presentan un cierto orden (cadenas paralelas o plegadas) (Fombuena Borrás y col., 2016).

Cabe mencionar que en este tipo de polímeros al disminuir la temperatura aumenta la viscosidad hasta llegar a la temperatura de fusión en donde el polímero se vuelve rígido y por debajo de esta temperatura (temperatura de transición vítrea) el material se vuelve frágil y duro (Universidad Politécnica de Valencia, 2020).

### **2.1.4.2 Elastómeros**

Son materiales con estructura reticulada con menor extensión que los termoestables (Universidad Politécnica de Valencia, 2020), capaces de resistir esfuerzos considerables, al aplicar una tensión experimentan deformaciones importantes, pero una vez que cesa dicha tensión recuperan su forma (Liera R. F. J., 2017), es decir, poseen un bajo módulo de elasticidad y alta extensibilidad (González García, 2018), otras propiedades importantes son su buen comportamiento elástico,

buena estabilidad térmica, resistencia al desgaste y al desgarro, no son reciclables y no son fáciles de transformar (Fombuena Borrás & col., 2016).

#### **2.1.4.3 Termoestables**

Los materiales termoestables son generalmente rígidos y reticulados, por lo que, una vez formados, al calentarse a muy elevadas temperaturas se degradan (Castro Pérez, 2020), es decir, reaccionan irreversiblemente a la aplicación de calor o presión, por lo que no se ablandan ni fluyen (Posada Bustamante, 2012). Como ejemplo de este tipo de polímeros se encuentra la baquelita, utilizada en mangos de utensilio de cocina, electrodomésticos y material eléctrico (Liera R. F. J., 2017). Sus características generales son: su alta rigidez y dureza, alta estabilidad térmica, son insolubles y aislantes térmicos y eléctricos (Labeaga Viteri, 2018), no son reciclables, su transformación es compleja, además, poseen alta fragilidad (Fombuena Borrás y col., 2016).

## **2.1.5 CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS DE ACUERDO A SUS PROPIEDADES MECÁNICAS**

Esta es una de las clasificaciones más importantes ya que de acuerdo a estas propiedades se puede determinar el uso de los materiales poliméricos, dichas propiedades se clasifican en: fibras, plásticos, recubrimientos y resinas.

### **2.1.5.1 Fibras**

Se trata de agrupaciones de macromoléculas lineales, configuradas extendidamente, mediante la formación de regiones ordenadas y orientadas (Universidad Politécnica de Valencia, 2020).

### **2.1.5.2 Plásticos**

Los plásticos son materiales que conservan la deformación causada por la aplicación de una fuerza, por lo que pueden ser moldeados a presión (Aldabe S. y col., 2004).

### **2.1.5.3 Recubrimientos**

Son líquidos que poseen la propiedad de adherirse a una superficie para proporcionarle otra propiedad, como la resistencia a la abrasión (González García, 2018).

### **2.1.5.4 Resinas**

Las resinas son líquidos viscosos con capacidad de endurecerse permanentemente. Dentro de este grupo se encuentran las resinas plásticas, las cuales son polímeros compuestos de monómeros de bajo peso molecular (Cornejo Arteaga, 2016).

## 2.1.6 REACCIONES DE POLIMERIZACIÓN

Las reacciones de polimerización consisten en un proceso químico, en el que mediante un catalizador, luz o calor se unen varias moléculas monoméricas para la formación de polímeros (figura 4) (Neira-Carrillo, 2015). El tamaño de la cadena del polímero crece durante todo el proceso de reacción, dando lugar en las últimas etapas a un polímero de alto peso molecular, con lo cual es correcto decir que a altas conversiones mayor es el peso molecular de dicho polímero (Alexandrova, 2003).

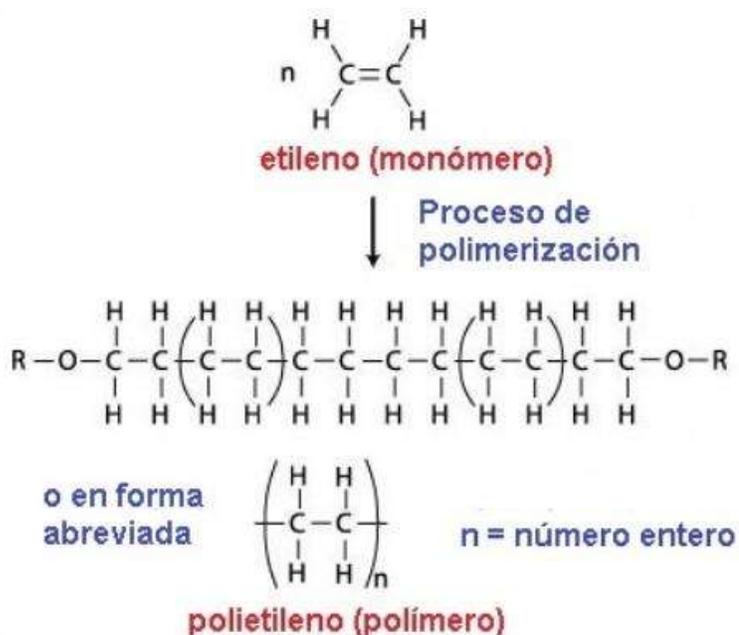


Figura 4: Polimerización del etileno tomada de (Liera R. F. J., 2017).

### 2.1.6.1 Polimerización por adición o crecimiento en cadena

Los polímeros de adición también conocidos como polímeros de crecimiento en cadena (Neira-Carrillo, 2015) se obtienen por la adición rápida y sucesiva de unidades monoméricas (Polyexcel, 2020) a una cadena en crecimiento de polímero, con un intermedio reactivo en el extremo de la cadena (Neira-Carrillo, 2015). Es decir, es la unión de monómeros a la cadena polimérica, unidos de uno en uno, así un monómero se une a otro para formar un dímero, al que se le une otro monómero para formar un trímero y así sucesivamente (Curiosoando.com, 2019). En este proceso se requiere de un iniciador, que produce un centro activo, que puede ser un radical libre, un anión, un

cación o un enlace catalizador–polímero, con lo que la polimerización puede llamarse polimerización por radicales libres, iónica o de coordinación, respectivamente. El proceso termina al destruirse el centro activo (Alexandrova, 2003), lo cual ocurre al combinarse dos cadenas con electrones libres o cuando se produce una reacción con radicales libres finalizadores resultantes de catalizadores o impurezas, el polímero obtenido mantiene unidas sus cadenas mediante fuerzas de Van der Waals, fuerzas polares, puentes de hidrogeno o por ovillamiento (Universidad Politecnica de Valencia, 2020). Los polisacáridos son ejemplos de ellos, ya que están formados unidades monoméricas de monosacáridos (Polyexcel , 2020), otros ejemplos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Algunos polímeros de adición tabla tomada y modificada de (Neira-Carrillo, 2015).

Polímeros	Grupo lateral	Reacción
Polietileno; PE	Hidrogeno; H	$n \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{C} = \text{C} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \longrightarrow \left( \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ -\text{C} - \text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right)_n$
Polipropileno; PP	Metilo; CH <sub>3</sub>	$n \begin{array}{c} \text{H} \quad \quad \text{H} \\ \diagdown \quad / \\ \text{C} = \text{C} \\ / \quad \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \quad \text{CH}_3 \end{array} \longrightarrow \left( \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ -\text{C} - \text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$
Poliestireno; PS	Fenilo C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	$n \begin{array}{c} \text{H} \quad \quad \text{H} \\ \diagdown \quad / \\ \text{C} = \text{C} \\ / \quad \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \longrightarrow \left( \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \\   \quad   \\ -\text{C} - \text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right)_n$
Cloruro de polivinilo; PVC	Cloro; Cl	$n \begin{array}{c} \text{H} \quad \quad \text{Cl} \\ \diagdown \quad / \\ \text{C} = \text{C} \\ / \quad \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \quad \text{H} \end{array} \longrightarrow \left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \\   \quad   \\ -\text{C} - \text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n$
Poliacrilonitrilo; PAN	Nitrilo; CN	$n \begin{array}{c} \text{H} \quad \quad \text{H} \\ \diagdown \quad / \\ \text{C} = \text{C} \\ / \quad \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \quad \text{C}\equiv\text{N} \end{array} \xrightarrow{\text{polimerización}} \left[ \begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\   \\ \text{C}\equiv\text{N} \end{array} \right]_n$ <p style="text-align: center;">acrilonitrilo <span style="margin-left: 100px;"></span> poliacrilonitrilo</p>

En este proceso de polimerización se presentan tres etapas características, las cuales se esquematizan en la figura 5 con la polimerización por radicales libres del poli(etilacrilato):

Etapas de iniciación: Generalmente es provocada por la acción de peróxidos orgánicos, que al aplicarles radiación o calor rompen su estructura dando lugar a radicales libres que obligan al desdoblamiento del doble enlace.

Etapas de propagación: En esta etapa la cadena crece de modo espontáneo.

Etapas de terminación: Termina el crecimiento de la cadena al producirse la unión del extremo de la cadena con un radical libre (finalizador) o mediante la unión de dos extremos de cadenas en crecimiento simultaneo (Universidad Politecnica de Valencia, 2020).

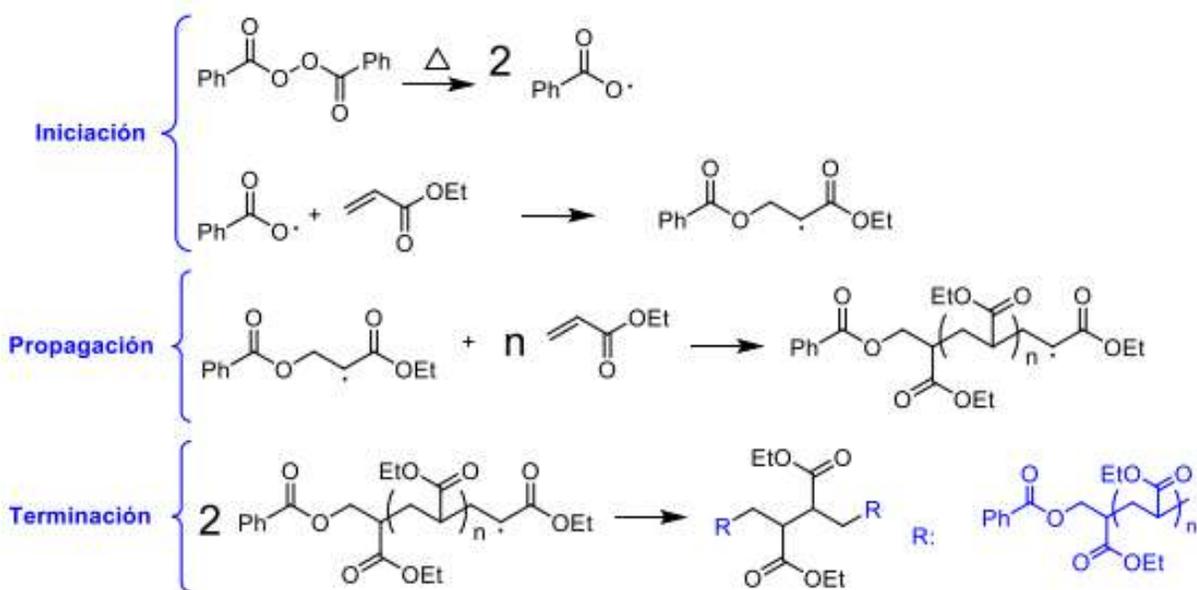


Figura 5: Polimerización por radicales libres del poli(etilacrilato) (Bolaños & Álvarez, 2018).

### 2.1.6.2 Polimerización por pasos, de crecimiento en cadena o por condensación

Los polímeros de condensación también llamados de crecimiento por pasos o en cadena se obtienen mediante la condensación entre monómeros (Neira-Carrillo, 2015), en este mecanismo se consiguen cadenas a partir de monómeros sin la presencia de un doble enlace. Este proceso también se lleva a cabo mediante la activación por efecto de un catalizador, la presión o la temperatura, produciendo la reacción de dos grupos activos que dan lugar a otro que se repite en la cadena polimérica (Universidad Politecnica de Valencia, 2020) con la eliminación de una molécula ligera como el agua, el amoniaco o el ácido clorhídrico (Liera, 2017). En la figura 6 se esquematiza la reacción de condensación entre el ácido adípico y el etilenglicol que da como producto un éster, el cual continúa elongando su cadena al poseer grupos funcionales disponibles para reaccionar, al finalizar la reacción se obtiene una molécula de poli(etilendipato) (Bolaños & Alvarez, 2018).

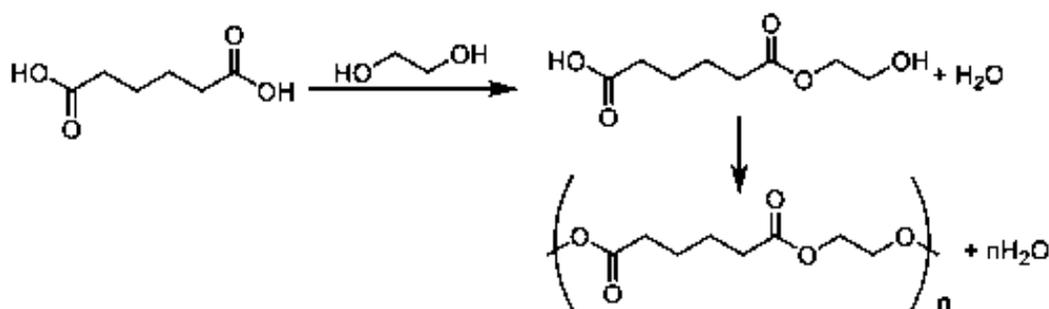


Figura 6: Polimerización por condensación de poli(etilendipato) (Bolaños & Álvarez, 2018).

Dicho de otro modo, un dímero se puede unir a otro dímero para formar un tetrámero, con eso se habla de que es posible la unión de oligómeros entre sí y con otros monómeros (Curiosoando.com, 2019), es importante mencionar que cada condensación es un paso individual, por lo que no se presenta una reacción en cadena (Neira-Carrillo, 2015) tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Unión de oligómeros (elaboración propia).

Monómero + Monómero → Dímero
Dímero + Monómero → Trímero
Dímero + Dímero → Tetrámero
Trímero + Monómero → Tetrámero
Trímero + Dímero → Pentámero
Trímero + Trímero → Hexámero
Tetrámero + Monómero → Pentámero
Tetrámero + Dímero → Hexámero
Tetrámero + Trímero → Heptámero
Tetrámero + Tetrámero → Octámero

#### 2.1.6.3 Polimerización de reordenamiento o de transposición

Se obtiene mediante la reacción entre monómeros que presentan transposición a lo largo de la polimerización, ejemplo de este tipo de materiales es el poliuretano (Polyexcel , 2020).

#### 2.1.6.4 Polimerización reticular

En esta reacción intervienen monómeros con más de dos sitios activos, lo que permite el crecimiento de las cadenas en las tres direcciones, dando como resultado redes tridimensionales. Un ejemplo es la reacción de polimerización del fenol con formaldehído que produce las baquelitas (Universidad Politecnica de Valencia, 2020).

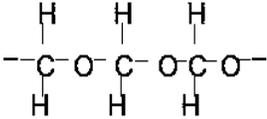
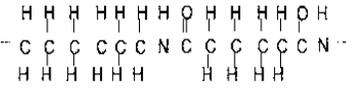
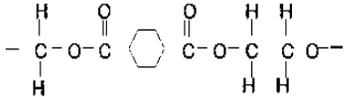
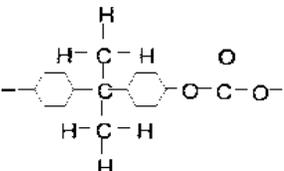
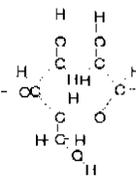
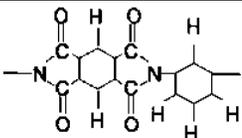
## 2.1.7 PRINCIPALES APLICACIONES DE LOS POLÍMEROS

La principal aplicación de los polímeros se centra en el embalaje, los contenedores y los dispositivos médicos (Luna, 2018), en la tabla 3, 4 y 5 se ilustran la estructura, las principales propiedades y aplicaciones de algunos termoplásticos, elastómeros y termoestables respectivamente.

Tabla 3: Estructura, propiedades y aplicaciones de termoplásticos (Universidad Politécnica de Valencia, 2020).

Polímero	Estructura	Carga rotura (MPa)	Alarg. (%)	Módulo de elasticidad (GPa)	Densidad (Mg/m <sup>3</sup> )	Temp. def. por calor a 455 kPa	Aplicaciones
PE Baja densidad Alta densidad	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{---C---C---} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	8-21 21-38	50-800 15-130	0.1-0.28 0.4-1.20	0.92 0.96	42 85	Aislantes eléctricos, artículos del hogar, botellas, embalaje
PVC	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \\   \quad   \\ \text{---C---C---} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	34-62	2-100	2.1-4.10	1.40	-	Aislantes eléctricos, revestimientos de suelos y de automóviles, válvulas, tuberías
PP	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{---C---C---} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \\   \\ \text{H} \end{array}$	28-41	10-700	1.1-1.5	0.90	115	Tanques, embalaje, fibras para ropa y sobrenvolturas

PS	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ -\text{C} - \text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{O} \end{array}$	22-55	1-60	2.6-3.1	1.06	82	Embalaje y espumas aislantes, revestimientos de automóviles, electrodomésticos y utensilios de cocina
PVPS	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \\   \quad   \\ -\text{C} - \text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array}$	24-34	160-240	0.3-0.55	1.15	60	Embalaje, tuberías, chubasqueros
PAN	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ -\text{C} - \text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{C}-\text{N} \end{array}$	62	3-4	3.5-4.0	1.15	78	Fibras textiles, precursor de fibras de carbono, embalaje de alimentos
PMMA	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{H}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\   \quad   \\ -\text{C} - \text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{C}=\text{O} \\   \\ \text{O} \\   \\ \text{H}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{H} \end{array}$	41-82	2-5	2.4-3.1	1.22	93	Acrilamiento de vehículos, lentes de contacto, iluminación exterior, señales publicitarias, pantallas de seguridad, gafas protectoras.
Policlorurotrifluoretileno	$\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{Cl} \\   \quad   \\ -\text{C} - \text{C}- \\   \quad   \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array}$	31-41	80-250	1.0-2.1	2.15	125	Aislante eléctrico, componente de válvulas, juntas.
PTFE	$\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\   \quad   \\ -\text{C} - \text{C}- \\   \quad   \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array}$	14-48	100-400	0.41-0.55	2.17	120	Cierres, juntas, válvulas, anillos de estancamiento, recubrimientos antiadherentes.

POM		65-83	25-75	3.6	1.42	165	Cojinetes, engranajes, bolígrafos, fijación de cañerías, aletas de ventiladores.
PA (Nylon)		76-83	60-300	2.8-3.4	1.14	245	Cojinetes, engranajes, fibras, textil, componentes de automóviles y componentes eléctricos.
PET		55-72	50-300	2.8-4.1	1.36	38	Fibras, películas fotográficas, cintas audio, recipientes para bebidas y comidas precocinadas.
PC		62-76	110-130	2.1-2.8	1.2	138	Componentes y herramientas eléctricas domésticas, lentes, material antivandálico.
Celulosa		14-55	5-50	1.4-1.7	1.30	67	Textiles (rayón), embalaje (celofán), adhesivos, recubrimientos, películas fotográficas, gafas de seguridad.
PI		76-117	8-10	2.1	1.39	320	Adhesivos, circuitos impresos, fibras para equipos aeroespaciales.

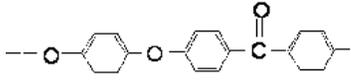
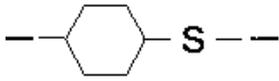
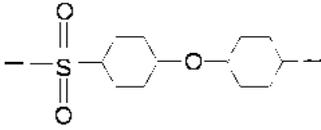
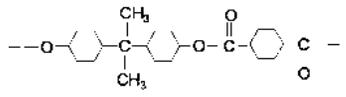
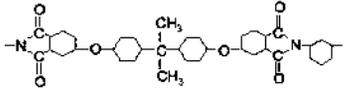
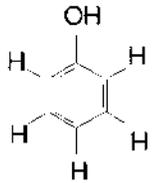
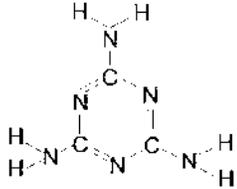
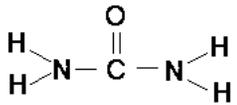
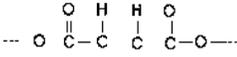
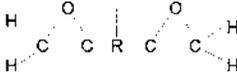
PEEK		70	50-150	3.8	1.31	160	Aislamientos eléctricos y recubrimientos para altas temperaturas.
PPS		65.5	1-2	3.3	1.3	135	Revestimientos, componentes eléctricos y electrónicos.
PES		84	30-80	2.4	1.37	200	Componentes de electrodomésticos, componentes de microondas.
Poliacrilato		62	50-65	2.2	1.21	180	Señales de tráfico, componentes de microondas.
PEI		105	60	2.9	1.27	210	Eléctricas, automoción y componentes de motores a reacción.
PAI		117-186	15	4.1-5.0	1.39	267	Componentes electrónicos, aplicaciones en automoción y aeroespaciales.

Tabla 4: Estructura, propiedades y aplicaciones de elastómeros (Universidad Politécnica de Valencia, 2020).

Polímero	Estructura	Carga a rotura (MPa)	Alarg. (%)	Densidad (Mg/m <sup>3</sup> )	Aplicaciones
Polisopreno	$\begin{array}{ccccccc} & & \text{H} & & & & \\ & &   & & & & \\ \text{H} & \text{H} & -\text{C}-\text{H} & & \text{H} & & \\   & &   & &   & & \\ -\text{C} & - & \text{C} = \text{C} & - & \text{C} & - & \\   & &   & &   & & \\ \text{H} & & \text{H} & & \text{H} & & \end{array}$	21	800	0.93	Neumáticos
Polibutadieno	$\begin{array}{ccccccc} & & \text{H} & & & & \text{H} \\ & &   & & & &   \\ -\text{C} & - & \text{C} = \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} - \\   & &   & &   & &   \\ \text{H} & & \text{H} & & \text{H} & & \text{H} \end{array}$	24		0.94	Neumáticos industriales, aislamiento de vibraciones
Polibutileno	$\begin{array}{ccccccc} & & \text{H} & & & & \text{H} \\ & &   & & & &   \\ \text{H} & \text{H} & -\text{C}-\text{H} & & \text{H} & \text{H} & \text{H} & -\text{C}-\text{H} \\   & &   & &   & &   & &   \\ -\text{C} & - & \text{C} = \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} - \\   & &   & &   & &   & &   \\ \text{H} & & \text{H} & & \text{H} & & \text{H} & & \text{H} \end{array}$	28	350	0.92	Tuberías, aislamientos, revestimientos
Neopreno	$\begin{array}{ccccccc} & & \text{H} & & & & \text{H} \\ & &   & & & &   \\ -\text{C} & - & \text{C} = \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} - \\   & &   & &   & &   \\ \text{H} & & \text{Cl} & & \text{H} & & \text{H} \end{array}$	24	800	1.24	Mangueras, vainas de cables
BS	$\begin{array}{ccccccc} & & \text{H} & & \text{H} & & \text{H} \\ & &   & &   & &   \\ -\text{C} & - & \text{C} - \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} - \\   & &   & &   & &   \\ \text{H} & & \text{H} & & \text{H} & & \text{H} \end{array}$	4-21	600-2000	1.0	Neumáticos
Butadieno-acrilonitrilo	$\begin{array}{ccccccc} & & \text{H} & & & & \text{H} \\ & &   & & & &   \\ -\text{C} & - & \text{C} = \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} - \\   & &   & &   & &   \\ \text{H} & & \text{H} & & \text{H} & & \text{H} \end{array}$	5	400	1.0	Juntas, mangueras para derivados del petróleo
Silicona	$\begin{array}{ccccccc} & & \text{H} & & \text{H} & & \text{H} \\ & &   & &   & &   \\ \text{H} & -\text{C}-\text{H} & & \text{H}-\text{C}-\text{H} & & \text{H}-\text{C}-\text{H} \\   & & &   & & &   \\ -\text{O}-\text{S}-\text{O} & - & \text{S} & - & \text{O} & - & \text{S} \\   & & &   & & &   \\ \text{H} & -\text{C}-\text{H} & & \text{H}-\text{C}-\text{H} & & \text{H}-\text{C}-\text{H} \\   & & &   & & &   \\ \text{H} & & & \text{H} & & & \text{H} \end{array}$	2.4-7	100-700	1.5	Juntas y cierres

Tabla 5: Estructura, propiedades y aplicaciones de termoestables (Universidad Politécnica de Valencia, 2020).

Polímero	Estructura	Carga rotura (MPa)	Alarg. (%)	Módulo de elasticidad (GPa)	Densidad (Mg/m <sup>3</sup> )	Aplicaciones
Fenólicos		34-62	0-2	2.8-9.0	1.27	Adhesivos, revestimientos, laminados.
Aminas	Melamina  Urea 	34-69	0-1	6.9-11.0	1.50	Adhesivos, almacenamiento de alimentos, moldeados eléctricos.
Poliéster		41-90	0-3	2.1-4.5	1.28	Moldeados eléctricos, laminados decorativos, matrices para refuerzo con fibra de vidrio.
Epoxis		28-103	0-6	2.8-3.4	1.25	Adhesivos, moldeados eléctricos, matriz para laminados aeronáuticos.

Uretanos	$  \begin{array}{ccccccc}  & H & H &   & H & H & \\  &   &   & &   &   & \\  H & -O-C & -N & -R- & N- & C- & O-H \\  &   & & & &   & \\  & H & & & & H &   \end{array}  $	34-68	3-6		1.30	Fibras, revestimientos, espumas, aislantes.
Furanos	$  \begin{array}{c}  & & H & & OH \\  & &   & &   \\  H & -C & =C & -C & -H \\  &   & &   & \\  & & & O & \\  & & &   & \\  H & -C & =C & -C & -H \\  &   & &   & \\  & & & O &   \end{array}  $	21-31	0	10.9	1.75	Aglomerantes para moldeo en arena.
Siliconas	$  \begin{array}{c}  & & H & & \\  & &   & & \\  & & O & - & H-C-H \\  & &   & &   \\  \cdots & -Si & -O & -Si & -O \cdots \\  &   & &   & \\  H & -C & -H & & \\  &   & & & \\  & H & & &   \end{array}  $	21-28	0	8.3	1.55	Adhesivos, juntas y cierres estancos.

## 2.2 PLÁSTICOS

Los plásticos son polímeros sintéticos con capacidad de ser moldeados (Flores Villa E., 2019). Estos se derivan del petróleo, el carbón o del gas natural, cubriendo aproximadamente el 5 % anual del uso de los mismos, creando una creciente escasez de dicha materia prima (Liñán, 2018). Algunos plásticos poseen propiedades mecánicas comparables a los metales, sin embargo, los plásticos siempre dominan en términos de peso (Alexandrova, 2003).

### 2.2.1 PRODUCCIÓN DE PLÁSTICOS EN EL MUNDO

Actualmente no hay área de actividad humana que no utilice plástico (Alexandrova, 2003). Cada día podemos encontrar más objetos hechos de materiales plásticos, creados por el ser humano para brindar mayor comodidad (Galego-Fernández & Rozsa-Galego, 2018). Los termoplásticos constituyen la mayor parte de los plásticos y entre ellos las poliolefinas (polietilenos y polipropilenos) son los termoplásticos con mayor producción a nivel mundial (Taverna, 2018).

Según datos de Statista (tabla 6, figura 7) en 2019 se generaron aproximadamente 368 MMTon de plástico a nivel mundial (Diaz, 2021), siendo Asia el continente de mayor producción, responsable de la mitad de la misma, seguido por América del Norte y en tercer lugar Europa (GREENPEACE, 2019).

El consumo de plástico se encuentra asociado al desarrollo económico de los países en materia de infraestructura y construcción, de transporte o en el sector electrónico o eléctrico, además del uso para envasado (Conde, 2020). De acuerdo a un informe redactado por el New York Times, el 50 % del plástico U.S.U. es fabricado por 20 empresas, de las cuales Exxon Mobil y Dow, empresas estadounidenses encabezan la lista, seguida por la empresa china Sinopec e Indorama Ventures, con sede en Bangkok (Corkery & Sengupta, 2021).

Tabla 6: Producción mundial de plástico de 1950 a 2019 (Díaz, 2021).

Año	Producción de plástico a nivel mundial (MMTon)
2019	368
2018	359
2017	348
2016	335
2015	322
2014	311
2013	299
2012	288
2011	279
2010	270
2009	250
2008	245
2002	200
1989	100
1976	50
1950	1.5

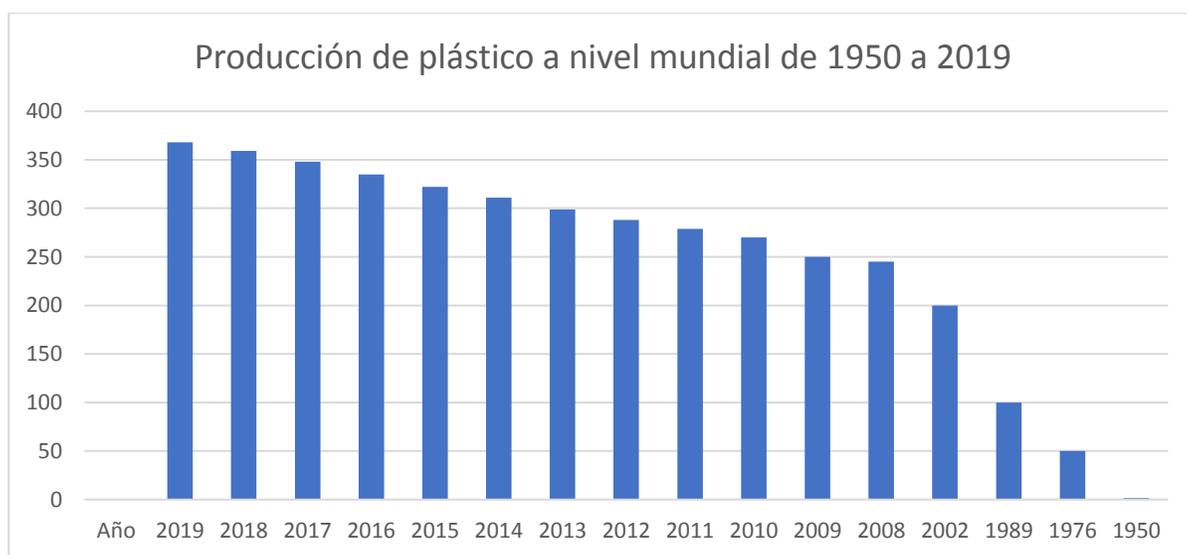


Figura 7: Producción de plástico a nivel mundial de 1950 a 2019 (Díaz, 2021).

Por mencionar algunos datos, para el 2019, en México, el sector del plástico representó el 3 % del PIB de manufactura con 260 mmdp y dicha industria sigue creciendo a un ritmo de 4 % anual, por otro lado, el consumo de plásticos en México viene representado por los plásticos commodities con un 82 % (casi 6.1 Mton.) y dentro de estos el PE representan el 34 % del consumo total de plásticos, el PP el 21 % (1.54 Mton.) y el PET tiene un impacto del 10 % (755 Kton.) (Conde, 2020).

## **2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS DE ACUERDO A SU APLICACIÓN**

De acuerdo a las propiedades de los plásticos se puede elegir entre uno u otro para su uso final. Entre las propiedades más destacadas se encuentran la elasticidad, la dureza, la fragilidad, la capacidad de aislamiento o reflectancia, la opacidad, transparencia o translucidez, la maleabilidad, entre otras (Curiosoando.com, 2019).

### **2.2.2.1 Plásticos estándar o commodities**

Son polímeros que, gracias a su precio y buenas propiedades, se fabrican y emplean en grandes cantidades (Aimplas, 2019), son fáciles de transformar a temperaturas relativamente bajas (Fombuena Borrás y col., 2016). Como ejemplo se encuentran el PE, el PP, el PS, el PVC, el ABS (Aimplas, 2019).

### **2.2.2.2 Plásticos de altas prestaciones**

En su mayoría son termoplásticos, poseen gran resistencia al calor, es decir a altas temperaturas poseen buenas propiedades mecánicas (Fombuena Borrás y col., 2016), como ejemplos se encuentran la PI, la PSU, la PES, la PAS, el PPS y los LCP (AproxymaPlastics, 2019).

### **2.2.2.3 Plásticos técnicos o de ingeniería**

Son materiales de gran dinamismo, se utilizan en el sector automotriz, industrial, eléctrico-electrónico y medico (Conde, 2020) ya que poseen buenas propiedades de resistencia a la temperatura, transparencia, estructurales, de autolubricación, etc. (Aimplas, 2019), su transformación es compleja (Fombuena Borrás y col., 2016). Como ejemplo se encuentran la PA, POM, el PC, el PET, el PPE y el PBT (Aimplas, 2019).

### **2.2.2.4 Plásticos de especialidad**

Este tipo de plásticos poseen una propiedad concreta en un grado excepcional como el PMMA que posee gran transparencia y estabilidad a la luz (AproxymaPlastics, 2019).

### **2.2.3 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL ASOCIADA AL USO DEL PLÁSTICO**

La tercera aplicación más utilizada a nivel mundial del petróleo es el plástico, con un consumo anual de 300 millones de toneladas, dando como consecuencia grandes emisiones atmosféricas de CO<sub>2</sub> (Pluas, R. J. y col., 2020), CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, y considerando que el petróleo es finito condiciona el futuro del plástico (Silva & Martínez, 2009).

El plástico usualmente llamado de usar y tirar o plástico U.S.U. es considerado uno de los mayores peligros para el medioambiente ya que contamina en el momento de su producción con la extracción de combustibles fósiles y después de su utilización al no ser descartado correctamente (Corkery & Sengupta, 2021). Entre las opciones de gestión de este tipo de residuos se encuentran el reciclaje, la incineración y la eliminación en vertederos, sin embargo, en todas las opciones mencionadas los plásticos causan un impacto medioambiental negativo gracias a la generación de gases contaminantes, sustancias tóxicas como furanos, dioxinas y disruptores endocrinos y lixiviados que contienen metales pesados que contaminan el suelo y el agua, además de la acumulación de plásticos en vertederos (Encalada y col., 2018).

Por otro lado, los plásticos no solo tienen consecuencias medioambientales, también tienen un efecto directo sobre los seres vivos, ya sea por la ingestión, el estrangulamiento, el atrapamiento o la toxicidad ya que muchos de ellos pueden ser carcinógenos (Bollaín Pastor & Vicente Agulló, 2020).

La tasa de producción de desechos plásticos supera por mucho la tasa de degradación del plástico, lo que provoca un desequilibrio ambiental (Halimatul y col., 2019). Para mitigar un poco la problemática, los gobiernos han prohibido el uso de algunos artículos fabricados con plástico U.S.U., como las bolsas, los vasos y los popotes (Corkery & Sengupta, 2021), debido a que generalmente son difíciles de reciclar gracias a que se fabrican con distintos tipos de materias plásticas y su separación para volver a utilizarlos es bastante difícil (Silva & Martínez, 2009), además, se tiene como desventaja que el esfuerzo se ha limitado

a la reducción de su producción y no en su disposición final, ya que es más económica su producción que su reciclaje (Corkery & Sengupta, 2021).

Una preocupación más importante son los microplásticos y los nanoplásticos, los cuales surgen de la fragmentación y deterioro de los macroplásticos (microplásticos secundarios) o pueden ser creados intencionalmente como las microperlas para el cuidado personal y los abrasivos (microplásticos primarios) (Hale, Seeley, La Guardia, Mai, & Zeng, 2020). La preocupación no solo se centra en el efecto de los microplásticos como tal, también en los aditivos y contaminantes químicos absorbidos por los mismos que pueden liberarse y afectar negativamente a los animales y al ambiente (Rainieri & Barranco, 2019).

El problema de los microplásticos ha llegado a lugares inimaginables como la Antártida, el hielo marino del Ártico, cadenas montañosas remotas y fosas oceánicas profundas (Hale, Seeley, La Guardia, Mai, & Zeng, 2020), áreas lejanas del origen del microplástico, lo que indica que existe transporte atmosférico a larga distancia del plástico (Zhang, Kang, Allen, Allen, & Gao, 2020).

## 2.3 BIOPLÁSTICOS

### 2.3.1 BIOPLÁSTICOS BIODEGRADABLES, BIOBASADOS Y COMPOSTABLES

A través del tiempo se han elaborado productos innovadores más amigables con la naturaleza y el medioambiente, como es el caso de los biopolímeros (Pluas, R. J. y col., 2020). Los biopolímeros son materiales poliméricos que pueden ser biodegradables, biobasados o ambos (ADAPT, 2020).

Los materiales biodegradables son aquellos que cumplen con los estándares y normas establecidas para la determinación de su biodegradabilidad (Jaso Sánchez). La norma ISO 14855 indica que las muestras son biodegradables cuando alcanzan el 90 % de biodegradación en un tiempo máximo de 180 días (6 meses, por otro lado, la norma ASTM D5488-944 define la biodegradabilidad como la capacidad de un material de descomponerse en CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> y otros componentes orgánicos o biomasa (Escribano Cajo, 2020) mediante la acción de microorganismos o por la acción de sintetización de biopolímeros (Morales Segura, 2018), es importante mencionar que para que se pueda dar un proceso de biodegradación se requiere la presencia de microorganismos, la presencia de aire en caso de ser aeróbica y ausencia de aire para las anaeróbicas, humedad y minerales, además de pH (5-8) y temperatura adecuados para el tipo de microorganismo a utilizar (20-60°C) (Escribano Cajo, 2020). Dentro de los plásticos biodegradables podemos encontrar los compostables, los cuales son materiales que se biodegradan en condiciones de una planta de compost, es importante mencionar que todos los materiales compostables son biodegradables pero no todos los biodegradables son compostables, ya que el término biodegradable se refiere al proceso y el término compostable se refiere al sitio donde ocurrirá el proceso (Ecoplas, 2020).

Por otro lado, los materiales biobasados son aquellos que se derivan de recursos naturales renovables (biomasa) (ADAPT, 2020), generalmente de plantas, algas y microorganismos, en algunos casos es posible producirlos a partir de residuos (Ecoplas, 2020).

En Europa se realizó la clasificación de siete tipos de materiales biobasados, entre los cuales se encuentran el PLA, el PTT, el PHA, los PURs, las poliamidas, los polímeros de celulosa y los polisacáridos (Morales Segura, 2018).

La figura 8 muestra de manera general la distribución de los polímeros.

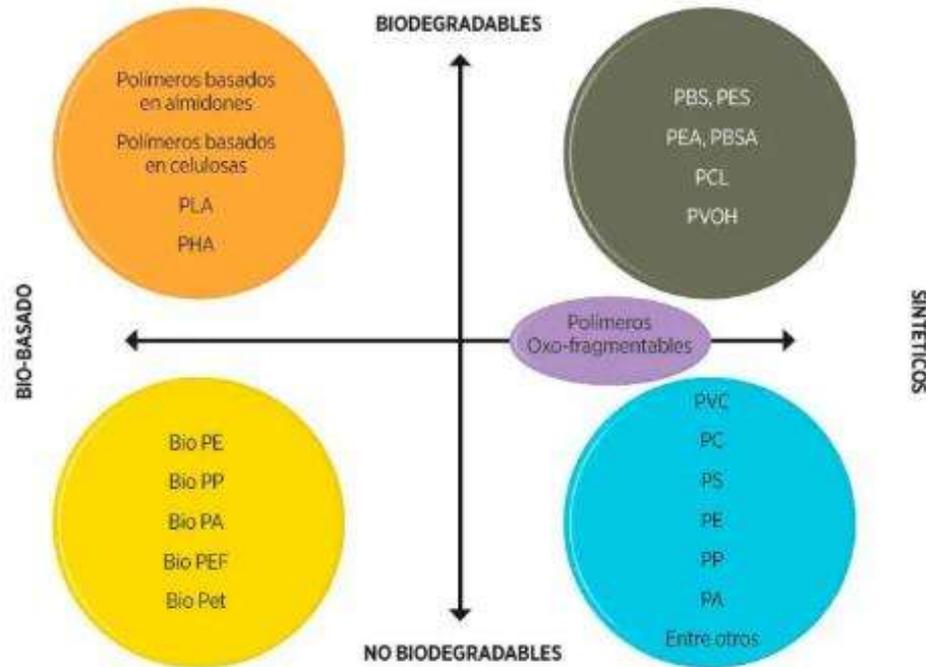


Figura 8: Distribución general de los polímeros (ADAPT, 2020).

Los biopolímeros se pueden procesar mediante las mismas tecnologías que se utilizan para la producción de polímeros convencionales como soplado, inyección, extrusión, compresión, termoformado y recubrimiento por extrusión de fibras y tejidos, por lo que no son necesarios grandes cambios tecnológicos (Morales Segura, 2018).

## 2.4 ALMIDÓN

El almidón es un polímero constituido por el monomero de la celulosa (figura 9) (González, 2011), compuesto estructuralmente por dos polisacáridos, la amilosa que es un monomero de glucosa de cadena lineal (figura 10) y la amilopectina que consta de monómeros de glucosa de cadena ramificada solubles en agua caliente (figura 11) (González García, 2018). La mayoría de los almidones se componen del 10 al 20 % de amilosa y entre el 80 % y 90 % de amilopectina (Gaitán Camacho, 2009). El almidón se encuentra presente en las plantas (González, 2011), principalmente en las raíces, los tubérculos, las frutas, los cereales y las legumbres, se encuentra en un rango de 25 a 90 % (Ojogbo y col., 2020), tiene un valor importante en la dieta humana (González, 2011).

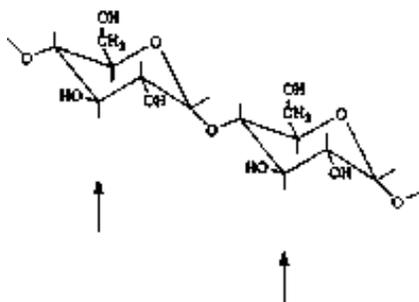


Figura 9: Estructura del almidón (González, 2011).

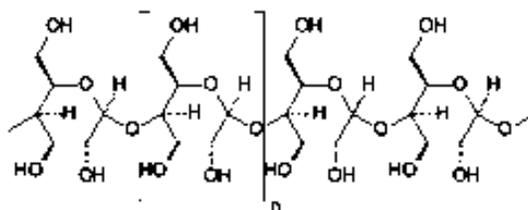


Figura 10: Estructura de la amilosa (González García, 2018).

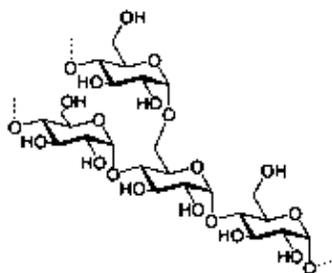


Figura 11: Estructura de la amilopectina (González García, 2018).

La papa, el trigo, el arroz, la cebada, la avena y la soya se encuentran entre las principales fuentes de almidón, pero, al utilizarlos para la elaboración de productos y no para el consumo alimenticio puede llevar a un problema futuro en caso de peligrar la seguridad alimentaria (Ruiloba I., 2018).

El almidón es la principal fuente de almacenamiento energético en el mundo vegetal (Anjum N., 2016). Es un polímero semicristalino con aproximadamente 1,000 –2,000,000 monómeros de glucosa unidos por enlaces  $\alpha$ -1,4 glicosídicos, posee tres grupos hidroxilo reactivos en la unidad de glucosa en la cadena de almidón, con un grupo hidroxilo primario y dos secundarios (Ojogbo, Ogunsona, & Mekonnen, 2020).

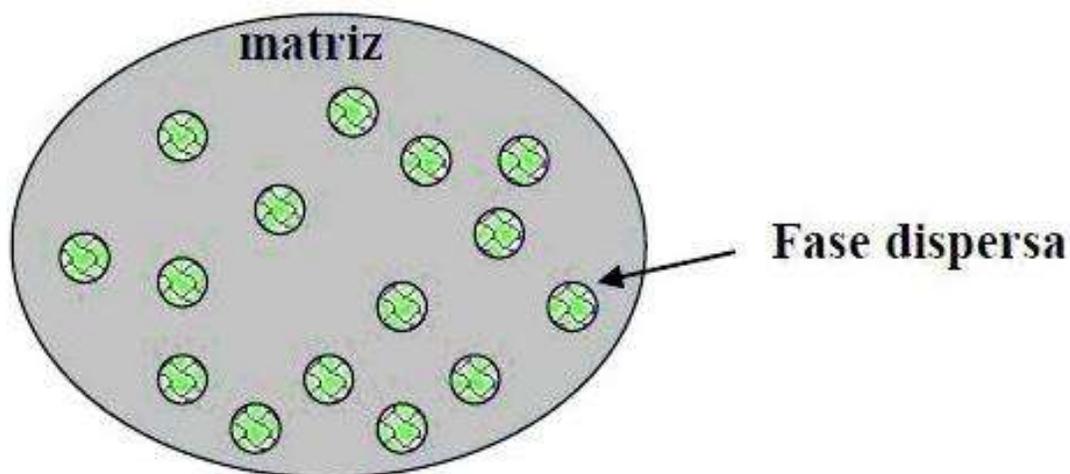
A bajas temperaturas los granulos de almidon son insolubles en agua, pero al aumentar la temperatura pueden contener agua, es decir, sufren un proceso de gelatinización, donde al finalizar este fenomeno se obtiene una pasta (González García, 2018).

Entre las principales aplicaciones de los almidones se encuentran: espesantes, gelificantes, aglutinantes, extensores, agentes para acabados, adhesivos, sustratos de fermentación, productos farmaceuticos, adhesivos y cosméticos, siendo aproximadamente el 75 % de su uso destinado a aplicaciones industriales y el 25 % a la alimentación (González García, 2018), por otro lado, ha sido utilizado en la elaboración de películas (Agarwal, 2021) ya sea como matriz polimérica en forma de almidón termoplástico o como nanocarga en forma de nanocristales (Avellán, y otros, 2020) y como abono agrícola, gracias a su degradación en productos inocuos al estar en contacto con los microorganismos del suelo (Silva & Martínez, 2009).

## 2.5 MATERIALES COMPUESTOS

Se denominan materiales compuestos o composites a aquellos materiales formados por dos o más materiales con distinta naturaleza, compuesto por una fase continua, a la que se le conoce como matriz y una fase dispersa o discontinua llamada relleno, aditivo o carga esquematizados en la figura 12 (Sagredo, 2017).

El componente principal de los materiales compuestos es la matriz, la cual da cohesión al material y en ella se aloja y protege al refuerzo, por otro lado, el refuerzo se encuentra disperso en la matriz para reforzarla y darle nuevas propiedades (Palomino Espinosa y col., 2014).



*Figura 12: Composición de los materiales compuestos (Mariano, 2011).*

### 2.5.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos pueden clasificarse de acuerdo a la composición de la matriz o a la forma o naturaleza de la fase dispersa.

#### 2.5.1.2 Clasificación de los materiales compuestos de acuerdo a su matriz

En esta clasificación se encuentran los materiales compuestos de matriz metálica (CMM), los materiales compuestos de matriz cerámica (CMC), y los materiales compuestos de matriz polimérica (PMC).

#### **2.5.1.2.1 Materiales compuestos de matriz metálica**

Este tipo de matriz ofrece una mayor resistencia al compuesto, buena tenacidad y rigidez, además de buen comportamiento a altas temperaturas, teniendo como contraparte una alta densidad y dificultada para su procesado y ensayado (Ingemecanica, 2019).

#### **2.5.1.2.2 Materiales compuestos de matriz cerámica:**

La matriz cerámica ofrece a los materiales compuestos una alta resistencia a los esfuerzos mecánicos pero una baja tenacidad, así como baja conductividad eléctrica y térmica (Ingemecanica, 2019).

#### **2.5.1.2.3 Materiales compuestos de matriz polimérica:**

Los plásticos pueden ser utilizados como matriz para dar origen a otros materiales compuestos o composites (Flores Villa E., 2019). Este tipo de matriz se caracteriza por su alta tenacidad, baja resistencia mecánica, rapidez y sencillez de conformado, baja densidad, bajo coste y alta resistencia a la corrosión (Ingemecanica, 2019).

Para fines de ese trabajo se abordará el tema de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales.

#### Polímeros reforzados con fibras naturales:

Las fibras naturales son utilizadas en compuestos poliméricos como refuerzos (Tarique y col., 2021), al agregar fibras naturales a una matriz polimérica se generan composites con el fin de obtener un producto amigable con el medio ambiente y utilizando residuos industriales de cada región (Flores Villa E., 2019). Las fibras naturales comúnmente empleadas son: el kenaf, las fibras de agave, de caña, celulósicas o lignocelulósicas, el yute, la cascara de coco, el sisal, el henequén, la borra de algodón, la corteza de algún árbol, el tallo de maíz, la cascarilla de arroz, bagazos, aserrín de madera, entre otras (López & Rojas, 2018).

El uso de fibras naturales como refuerzo tiene numerosas ventajas como su alta biodegradabilidad, bajo costo, alta disponibilidad y reducción en la deforestación, además de su alto potencial de convertirse en productos útiles (Tarique y col., 2021).

### **2.5.1.3 Clasificación de los materiales compuestos de acuerdo a la forma o naturaleza de la fase dispersa**

Los compuestos pueden estar reforzados por partículas, fibras o estructurales (figura 13).

#### **2.5.1.3.1 Materiales compuestos reforzados por partículas**

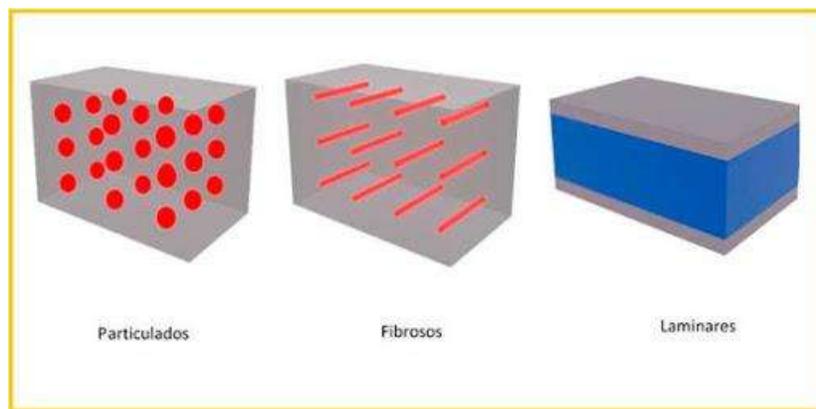
Son materiales reforzados con partículas equiaxiales, las cuales se introducen en la matriz y ayudan a endurecer el material bloqueando el movimiento de las dislocaciones (Angel, 21).

#### **2.5.1.3.1 Materiales compuestos reforzados con fibras**

En este tipo de composites el refuerzo son fibras que pueden estar colocadas de manera continua o discontinua, una fibra se define como un material con una relación longitud-diámetro alta (<https://www.visocym.com/>, 2021).

#### **2.5.1.3.1 Materiales compuestos estructurales**

Son el resultado de la combinación de materiales homogéneos y compuesto, estos pueden ser laminados (constituidos por apilamiento de láminas paralelas) o tipo sándwich (compuestos de núcleo y tapas) (Mariano, 2011).



*Figura 13: Tipos de refuerzos (Mariano, 2021).*

## 2.6 PLASTIFICANTES

De acuerdo a la IUPAC, un plastificante es un aditivo que se incorpora a los materiales plásticos para facilitar su transformación y aumentar su flexibilidad (Alvarado Hernández , 2019), la función del plastificante es penetrar en el polímero y reducir la fuerza de atracción entre sus cadenas (Mexpolimeros, 2014). Los plastificantes pueden ser: alcoholes, agua, aldehídos, aminas, cetonas, ácidos orgánicos, amidas, ésteres o una mezcla de ellos (Enríquez C. y col., 2012),

Al adicionar plastificantes al almidón se obtiene un termoplástico mediante la desestructuración espontanea de la estructura semicristalina del almidón y la formación de enlaces de hidrógeno entre el almidón y el plastificante (Encalada y Col., 2018). Un buen plastificante, además del más utilizado para el almidón es la glicerina (Heydari y col., 2013). La glicerina también conocida como glicerol, se presenta en un alcohol con tres grupos hidroxilo (-OH), es un líquido incoloro, viscoso, neutro, de sabor dulce, con capacidades hidrofílicas, insoluble en aceites, punto de ebullición alto, capaz de disolverse en alcohol y agua, se encuentra en las grasas y aceites de los animales y vegetales, no genera reacciones secundarias (Escribano Cajó, 2020; QuimiNet, 2012). La formula química de la glicerina se compone por 1, 2, 3 propanotriol, 1, 2, 3 trihidroxipropano, glicerol o glicerina ( $C_3H_8O_3$ ), como se observa en la figura 14, además, la glicerina presenta propiedades físicas y químicas que permiten su utilización y aplicación en distintos procesos químicos, es un compuesto estable y compatible con una gran cantidad de sustancias (Torres-Rivero, L. y col., 2019).

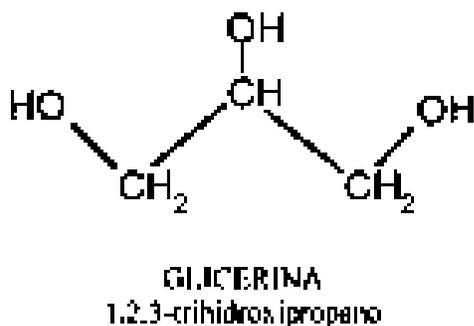


Figura 14: Molécula de la glicerina (Torres-Rivero, L. y col., 2019).

## 2.7 AGUACATE

El aguacate (*Persea americana Mill.*), es una baya con una cubierta rugosa denominada exocarpio o piel (13 % del peso total del fruto) de color verdoso de mesocarpio o pulpa (72 %) y endocarpio o cubierta de la semilla (0.3 %) carnosos y de color verde claro y con una sola semilla (14.7 %) color café cuya composición se presenta en la figura 16. Su principal componente es el agua, seguido por las grasas (Flores Rubio , 2020; Ceballos P. & Montoya B., 2013). Este fruto tiene su origen en Mesoamérica, su nombre proviene del nahuatl “ahuacatl” que significa “testículos del árbol” (Pérez, 2019).

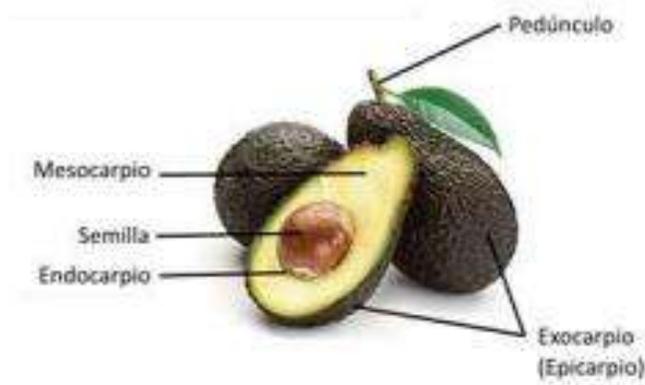


Figura 15: Componentes que constituyen un aguacate (Flores Rubio , 2020).



Figura 16: Composición de la semilla de aguacate (Chel-Guerrero y col. 2016)

México es el principal productor y exportador de aguacate, de acuerdo a datos reportados por el SIAP de SAGARPA, en el año 2020 tuvo una producción total de 2,393,848.57 ton y como principal productor se encuentra Michoacán con 1,800,021.42 ton, seguido por Jalisco con 248,192.73 ton y Ciudad de México con 118,268.01 ton (SIAP, 2020).

Michoacán produce mundialmente casi el 30 % de aguacate y nacionalmente alrededor del 50 % gracias a que su suelo y su clima son ideales para la producción de esta fruta, ocasionando un problema ya que se cultiva sin ningún tipo de planeación ni respeto ambiental (Pérez, 2019).

## 2.8 AGAVE CUPREATA

El agave cupreata, es también conocido como maguey papalote, gordito o papalotl (mariposa en náhuatl) gracias a la forma de sus pencas (figura 17). En general, toma la forma de una roseta de 1 m de ancho y 80 cm de alto, sus hojas son de color verde brillante, lanceoladas, presenta flores amarillas (Salas Tornés & Hernández Sánchez , 2015). Esta especie endémica proviene de la cuenca del Balsas-Mezcala en los estados de Michoacán y Guerrero, además de los estados de Oaxaca y Morelos (Uc León, 2017).



*Figura 17: Penca de agave cupreata (Salas Tornés & Hernández Sánchez , 2015).*

De acuerdo a datos reportados por el SIAP de SAGARPA, la producción de agave mezcalero en México durante el 2020 fue de 393,604.65 ton, siendo Oaxaca el principal productor con 183,513.78 ton, seguido por Guanajuato con 56,983.70 ton y en tercer lugar Michoacán con 51,700.35 ton (SIAP, 2020).

El bagazo proveniente del proceso de la elaboración del mezcal puede ser utilizado para generar otros productos de valor agregado, entre ellos, por ejemplo, la generación de energía gracias a su composición química (tabla 7).

*Tabla 7: Composición química del bagazo de agave cupreata (Uc León, 2017).*

<b>Composición</b>	<b>Peso (%)</b>
Lignina	17.81
Holocelulosa (celulosa + hemicelulosa)	65.48
Cenizas	7.75
Humedad	8.62

# **CAPÍTULO 3:**

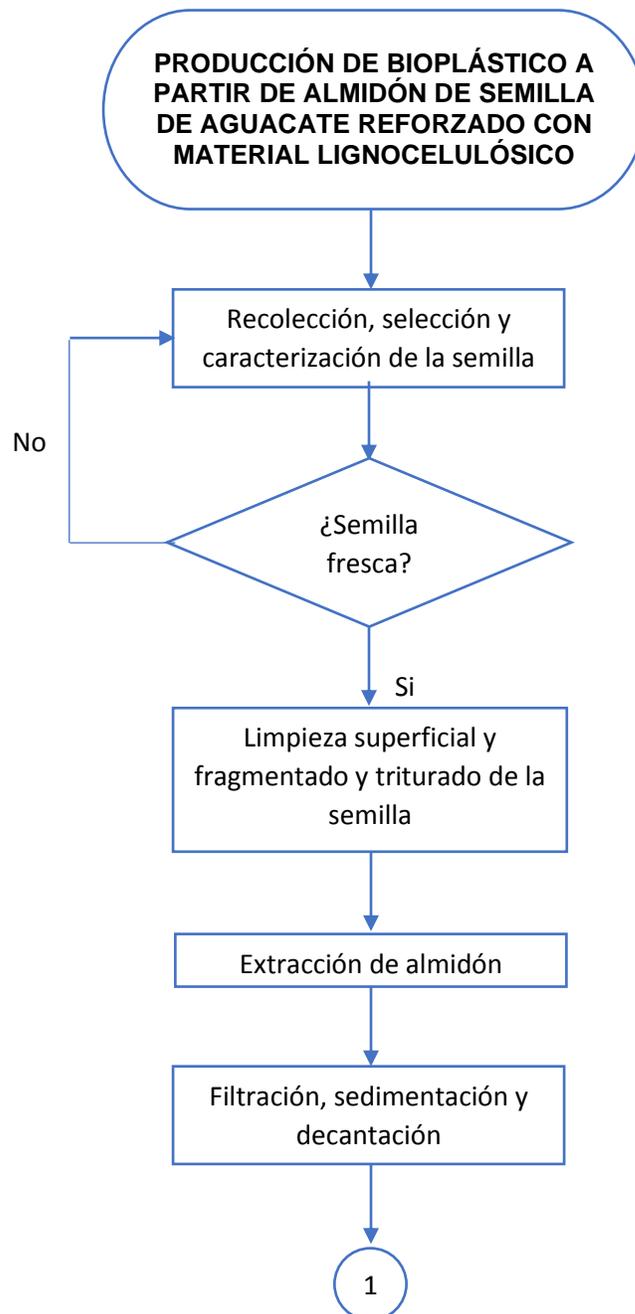
## **METODOLOGÍA**

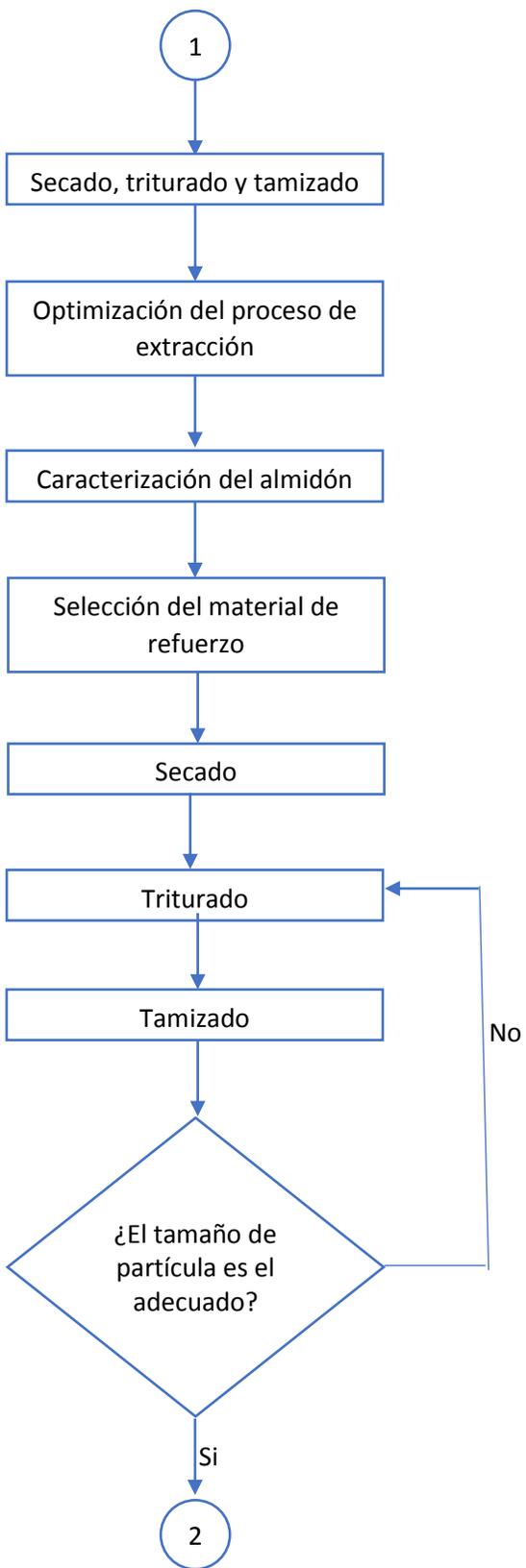
---

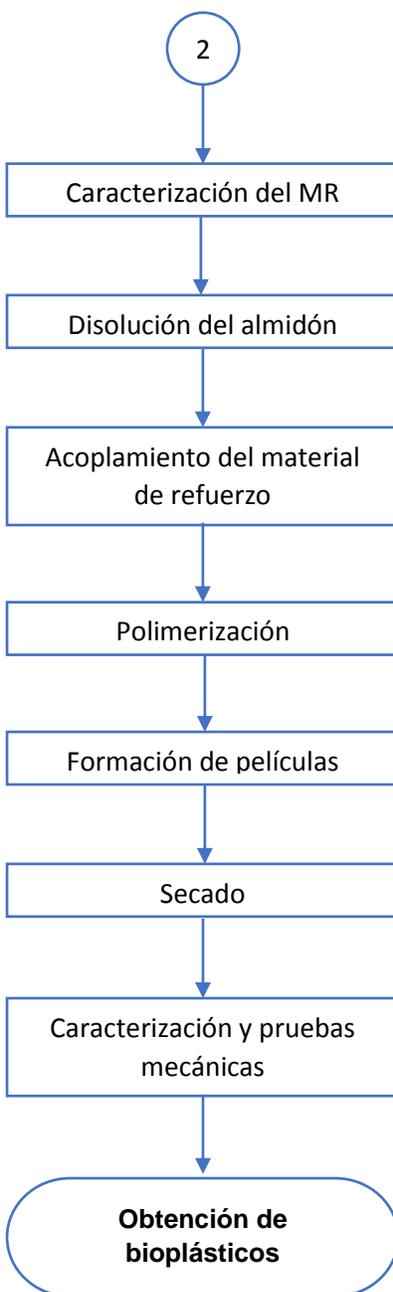
En este apartado se detalla la metodología realizada para la extracción del almidón proveniente de la semilla de aguacate, la selección del MR, el cual se seleccionó gracias a su disponibilidad, así como el proceso de la elaboración de las biopelículas y la caracterización de todos los materiales.

### 3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

El proceso se divide en cuatro secciones generales: La extracción del almidón, la selección del MR, la elaboración de las biopelículas y las caracterizaciones y pruebas mecánicas respectivas a cada material, la metodología general se esquematiza en el diagrama de flujo presentado y se abordará más a fondo en las secciones posteriores:







## 3.2 OBTENCIÓN DEL ALMIDÓN

### 3.2.1 REACTIVOS

1. Semilla de aguacate (*Persea spp.*) que se obtuvo como desecho del proceso de la elaboración de guacamole de distintos negocios de comida, así como de la empresa guacamolera “goverden®”.
2. Agua

### 3.2.2 MATERIALES:

1. Licuadora
2. Cedazo de tela
3. Colador
4. Estufa
5. Mortero
6. Malla No. 100
7. Balanza analítica

### 3.2.3 METODOLOGÍA

1. El proceso comienza con la recolección, selección y limpieza superficial y caracterización de la semilla de aguacate, posteriormente se corta en trozos pequeños y se pesa para determinar el rendimiento al final del proceso.
2. Licuado: Se licua la muestra hasta obtener una harina, dicha harina es utilizada para la extracción de almidón.
3. Extracción del almidón: La extracción consiste en mezclar en relación 1:2 harina-agua y dejar reposar la mezcla durante al menos 20 minutos.
4. Filtración: La solución resultante es filtrada separando la fase acuosa de la sólida.
5. Sedimentación y decantación: El filtrado se refrigera durante 48 horas, posteriormente se decanta, en la cual se elimina el líquido de la superficie, nuevamente se añade agua limpia y se deja reposar para que se precipite hasta que el agua a decantar sea completamente clara.

6. Secado: El precipitado contiene el almidón extraído de la semilla, se seca en una estufa a 50°C durante al menos 2 horas, una vez transcurrido el tiempo se tritura con un mortero y se tamiza.
7. Tamizado: Se deja pasar la muestra por una malla No. 100 para retirar partículas superiores al tamaño deseado.
8. Análisis experimental para determinar las mejores condiciones para la extracción del almidón en base al rendimiento, cambiando los siguientes parámetros: contenido de humedad, temperatura de la extracción y tiempo de molienda.

### **3.3 SELECCIÓN DEL MR**

#### **3.3.1 REACTIVOS**

1. Harina de la semilla de aguacate (*Persea spp.*) proveniente del proceso de extracción del almidón (proceso anteriormente mencionado).
3. Bagazo de agave cupreata proveniente del proceso de la elaboración del mezcal en el pueblo de Etúcuaro Michoacán.

#### **3.3.2 MATERIALES:**

1. Molino
2. Estufa
3. Malla No. 100

#### **3.3.3 METODOLOGÍA**

1. El proceso comienza con la recolección, selección y caracterización del material lignocelulósico, en este caso en base a su disponibilidad y al tamaño de partícula.
2. Secado: Se seca el material en una estufa a 50 °C.
3. Triturado: Se hace pasar la muestra por un molino triturador hasta obtener una harina.
4. Tamizado: Se dejan pasar las muestras por la malla No. 100 para retirar partículas mayores al tamaño deseado.

## **3.4 FORMACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS**

### **3.4.1 REACTIVOS**

1. Almidón y harina de la Semilla de aguacate (*Persea spp.*) obtenidos en etapas anteriores
2. Bagazo de agave cupreata
3. Agua
4. Ácido acético (vinagre)
5. Glicerina 100 % pura

### **3.4.2 MATERIALES:**

1. Vasos de precipitados
2. Plancha de calentamiento
3. Espátula
4. Balanza analítica
5. Balanza granataria
6. Agitador
7. Termómetro
8. Estufa
9. Cajas de Petri
10. Pipeta graduada con perilla de succión

### **3.4.3 METODOLOGÍA**

El almidón obtenido es la base para producir el bioplástico, la cual se elabora de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Se disuelve el almidón en agua con calentamiento y agitación constante, se agrega el porcentaje deseado de MR a la mezcla, continuando con la agitación hasta obtener una mezcla homogénea.
2. Una vez disuelta la solución anterior se adiciona glicerol como agente plastificante. La solución resultante se calienta a 90°C durante 10 minutos

en baño de maría, posteriormente se disminuye la temperatura hasta 50°C manteniendo agitación constante.

3. Para la formación de las biopelículas se disponen volúmenes de 15 ml por placa, en cajas de Petri.
4. El secado se realiza en una estufa a 50°C durante 24 horas, asegurando la dispersión y uniformidad de las biopelículas previo al secado.

## 3.5 CARACTERIZACIÓN

### 3.5.1 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y DE SÓLIDOS TOTALES

Se determina el contenido de humedad de la semilla de aguacate fresca y al mes de su extracción, del almidón y del MR, así como de las biopelículas que presentaron los mejores resultados.

Para determinar la humedad se realizó el método de la estufa por triplicado, se colocan las muestras a 100 °C durante 24 horas en un recipiente previamente tarado, una vez transcurrido el tiempo se dejan enfriar a temperatura ambiente en un desecador, el proceso continúa hasta obtener peso constante. Posteriormente se determina la humedad del material por diferencia de peso (ecuación 1).

Por otro lado, la materia remanente es considerada como sólidos totales, cuyo cálculo se realiza mediante la ecuación 2.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{W - W_1}{W_2} * 100 \quad (1)$$

Donde:

$W$  = Peso del recipiente con la muestra húmeda, en gramos.

$W_1$  = Peso del recipiente con la muestra seca.

$W_2$  = Peso de la muestra en gramos.

$$\% \text{ Total de sólidos} = 100 - \% \text{ Humedad} \quad (2)$$

### 3.5.2 DETERMINACIÓN DE CENIZAS

Se realiza la determinación de cenizas de la semilla de aguacate, del almidón obtenido y del bagazo de agave en base a lo descrito en la norma ASTM E1755-01 mediante la calcinación de la materia orgánica presente y la determinación gravimétrica del residuo (ecuación 3), de acuerdo a la siguiente metodología: Se pesa de 0.5 a 2 g de muestra en una cápsula de porcelana previamente tarada, posteriormente llevar a la mufla a  $575 \pm 25$  °C durante al menos 4 h. Transcurrido este tiempo, apagar la mufla y esperar a que la temperatura baje hasta 120 °C aproximadamente, retirar el crisol con el residuo (cenizas) y colocar en un desecador, al cabo de por lo menos 40 min. el crisol alcanza la temperatura ambiental, y con ello, determinar el peso de las cenizas en una balanza analítica.

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{P_1 - P_2}{P_m} \quad (3)$$

Donde:

$P_1$  = Peso en gramos del crisol con cenizas

$P_2$  = Peso en gramos del crisol vacío

$P_m$  = Peso en gramos de la muestra

### 3.5.3 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES Y SÓLIDOS FIJOS

La técnica 2540G de Standard Methods (Standard Methods, 1989) permite la determinación de cenizas volátiles de los materiales, en este caso de la semilla de aguacate, del almidón obtenido y del bagazo de agave, en base a los resultados de la determinación de humedad descrito en el punto 3.5.1 y de cenizas descrito en el punto 3.5.2 de los materiales, para lo cual se calcula con la ecuación 4.

$$\% SV = \frac{P_s - P_c}{P_m} * 100 \quad (4)$$

Donde:

$SV$  = Porcentaje de sólidos volátiles

$P_s$  = Peso en gramos de la muestra seca

$P_c$  = Peso en gramos de la muestra calcinada

$P_m$  = Peso en gramos de la muestra

La materia remanente son los sólidos fijos, los cuales se determinan mediante la ecuación 5.

$$\% SF = \% ST - \% SV \quad (5)$$

### 3.5.4 DETERMINACIÓN DE ALMIDÓN APARENTE

Para determinar la presencia de almidón en la semilla de aguacate, del almidón extraído, así como en el MR, es decir, en la harina resultante después de la extracción del almidón de la semilla y del bagazo de agave cupreata es posible realizar la prueba del yodo, que es la reacción de formación de cadenas de poliyoduro, (triyoduro,  $I_3^-$ ) que se enlazan con el almidón en las hélices del polímero, en esta reacción la amilosa del almidón se une a las moléculas de yodo, dando como resultado una coloración azul oscuro y en ocasiones prácticamente negro, en esta reacción la amilopectina no reacciona con el yodo (Amaya-Pinos, 2019).

Para la realización de esta prueba es necesaria una disolución de 1 g de yodo y 0.5 g de yoduro de potasio en 100 ml de agua destilada, esta disolución también es conocida como Lugol.

El procedimiento consiste en colocar una muestra de cada uno de los materiales antes mencionados y con el gotero unas gotas de Lugol y observar la coloración de la muestra, como ya se mencionó anteriormente, la presencia de coloración azul oscuro o negro indica la presencia de almidón.

### 3.5.5 RENDIMIENTO DE LA EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN Y DE HARINA (MR) DE LA SEMILLA DE AGUACATE

El rendimiento de este proceso permite conocer la cantidad de almidón y de harina (MR) que se puede obtener de la semilla de aguacate a condiciones específicas dadas. El rendimiento se calcula en relación a la semilla procesada de acuerdo a la ecuación 6:

$$\% R = \frac{W_1}{W_2} * 100 \quad (6)$$

Donde:

$R$ = Rendimiento de la extracción del almidón o de la harina se la semilla (MR) según sea el caso.

$W_1$ = Peso del almidón obtenido o de la harina de la semilla (MR) obtenida en gramos.

$W_2$ = Peso de la semilla de aguacate alimentada al proceso de la cual se extrae el almidón y la harina en gramos.

### 3.5.6 CUANTIFICACIÓN DE LA RELACIÓN AMILOSA-AMILOPECTINA

La cuantificación de la relación amilosa-amilopectina se llevó a cabo por colorimetría utilizando el kit de ensayo “*MEGAZYME: AMYLOSE/AMYLOPECTIN ASSAY PROCEDURE K-AMYL 20/20*”, cuyo método se basa en el pretratamiento del almidón, posteriormente la precipitación y eliminación total de la amilopectina del almidón, permitiendo medir fácilmente la amilosa, además, de la cuantificación total del almidón, y así, por diferencia determinar el contenido de amilopectina presente en el almidón.

El cálculo se lleva a cabo por espectrofotometría, mediante la medición de la absorbancia a 510 nm y de acuerdo a la ecuación 7:

$$\begin{aligned} \% \text{ Amilosa} &= \frac{\text{Absorbancia (Sobrenadante Con A)}}{\text{Absorbancia (Alicuota de almidon total)}} * \frac{6.15}{9.2} * \frac{100}{1} \\ &= \frac{\text{Absorbancia (Sobrenadante Con A)}}{\text{Absorbancia (Alicuota de almidon total)}} * 66.8 \end{aligned} \quad (7)$$

### **3.5.7 TEMPERATURA DE GELATINIZACIÓN DEL ALMIDÓN**

La temperatura de gelatinización es aquella en la que inicia el hinchamiento de los gránulos del almidón, a esta temperatura el almidón forma un gel, el proceso de gelatinización es un procedimiento obligado como pretratamiento para convertirlo en distintos productos, tal es el caso de la formación de los bioplásticos, de acuerdo a la metodología descrita por Gonzáles García (2018) se realiza de la siguiente manera:

Pesar y disolver almidón en agua destilada en relación 1:10, una vez disuelto, calentar la muestra a baño de María bajo agitación constante hasta formar una pasta, una vez que esta pasta permanece estable por unos segundos medir la temperatura directamente del termómetro, a esta temperatura se le conoce como temperatura de gelatinización del almidón.

### **3.5.8 DETERMINACIÓN DE pH DEL ALMIDÓN**

Para la determinación de pH preparar una suspensión pesando 10 g de almidón en un vaso de precipitados de 100 ml, se adicionan 50 ml de agua destilada, se agita continuamente durante 5 min y se determinar el pH mediante tiras medidoras.

### **3.5.9 CANTIDAD DE AGUA FAVORABLE PARA LA FORMACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS**

Determinar la cantidad óptima de agua para la formación de las biopelículas es importante ya que si se le agrega poca no se produce la gelatinización completa del almidón, por otro lado, no excederse ayuda al ahorro de la misma, lo cual favorece en términos económicos y ambientales ya que esa agua terminará evaporándose durante el secado, lo que conlleva un mayor gasto de energía en el proceso.

Para realizar este procedimiento se realiza por triplicado distintas corridas para la formación de las biopelículas, en las que se toma una relación 1:1 de almidón–agente plastificante, se deja fija la cantidad de ácido acético (10 % en este caso), variando la cantidad de agua (aumentando 10 % en cada corrida), se calienta la mezcla hasta temperatura de gelatinización del almidón bajo agitación constante y se observa la formación de la pasta, una vez que se obtiene homogeneidad y fácil agitación en la misma se obtiene la cantidad de agua óptima agregada a la mezcla.

### 3.5.10 ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO (IR)

Para la determinación de los espectros de IR del almidón, de la glicerina y de los bioplásticos se utiliza el espectrómetro Pekin Elmer Septum 100 FT-IR Spectrometer a una longitud de onda de 4,000 a 650 nm.

### 3.5.11 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS BIOPLÁSTICOS

Para los ensayos mecánicos se utiliza una Máquina de Pruebas Universales Instron modelo 3345, la cual se muestra en la figura 18 y, en base a la norma ASTM D 638 con el tipo de muestra V, dicho ensayo permite la evaluación de la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad.



*Figura 18: Máquina de Pruebas Universales Instron 3345.*

### 3.5.12 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL BIOPLÁSTICO

La medición de la densidad del bioplástico se determina siguiendo la norma ASTM D792-91, con la siguiente metodología y mediante la ecuación 8.

1. Se cortan muestras de bioplásticos de 2x2 cm.
2. Se pesan en una balanza analítica.
3. En una probeta se coloca un volumen específico de agua.
4. Se sumerge completamente la muestra de bioplásticos en el agua.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (8)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad

$m$  = Masa del biopolímero plástico

$V$  = Volumen desplazado de agua

### 3.5.13 MEDICIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA EN LOS BIOPLÁSTICOS

Para la determinación de la absorción de agua de acuerdo a la metodología descrita por Halimatul y col. (2019) se cortan muestras con dimensiones de 10x10x3 mm se pesan y se secan en un horno de circulación de aire a  $105 \pm 2$  °C durante 24 h para eliminar la humedad existente, posteriormente se sumergen las muestras en agua a temperatura ambiente ( $23 \pm 1$  °C) durante 24 h, una vez transcurrido el tiempo se vuelven a pesar las muestras. Esta prueba se repite 10 veces usando otras muestras de la misma formulación y se registra la ganancia de peso durante 2, 4, 6, 8 y 24 horas. El porcentaje de absorción de agua se calcula utilizando la ecuación 9.

$$\text{Absorción de agua} = \frac{w_f - w_i}{w_i} * 100 \quad (9)$$

Donde:

$w_f$  = Masa final

$w_i$  = Masa inicial

### 3.5.14 MEDICIÓN DE LA SOLUBILIDAD EN AGUA DE LOS BIOPLÁSTICOS

De acuerdo a la metodología descrita por Halimatul y col. (2019) se cortan muestras de bioplástico con las siguientes medidas: 10 x 10 x 3 mm, se secan a  $105 \pm 2$  °C para determinar sus pesos iniciales, posteriormente se sumergen en agua destilada, agitándolas suavemente de vez en cuando. Transcurridas 24 h de inmersión, se toman las muestras y se elimina el agua de la superficie con papel filtro, por último, se secan nuevamente las muestras a  $105 \pm 2$  °C durante 24 h para determinar su masa final. El porcentaje de solubilidad en agua se calcula mediante la ecuación (9).

### 3.5.15 DEGRADACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS

Para la determinación del tiempo de degradación de los bioplásticos se realizan dos pruebas, en la primera se dejan los bioplásticos previamente llevados a peso constante a la intemperie, a temperatura y humedad ambiente, para la segunda prueba se entierran los bioplásticos previamente llevados a peso constante a una profundidad de 3 cm en recipientes de vidrio cerrados que contienen suelo (tierra) recolectada a la orilla de un río de aguas negras con un pH de 5.5, dicho recipiente se mantiene a 30°C en una estufa para controlar la temperatura.

Al cabo de 30, 60, 90, 120, 150 y 180 días (6 meses de acuerdo a la norma) se retiran las muestras, se limpian y se llevan a peso constante. El porcentaje de pérdida de peso se determina mediante la ecuación 10.

$$\% P_{perdida} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100 \quad (10)$$

Donde:

$P_{perdida}$  = Pérdida de peso

$P_1$  = Peso inicial de la muestra

$P_2$  = Peso final de la muestra

# **CAPÍTULO 4:**

## **RESULTADOS**

---

Los resultados obtenidos de acuerdo a la metodología descrita en el apartado anterior se ordenan de acuerdo al proceso de experimentación seguido en el laboratorio.

## 4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA SEMILLA DE AGUACATE

### 4.1.1 CONTENIDO DE HUMEDAD, DE CENIZAS, DE SÓLIDOS TOTALES. VOLÁTILES Y FIJOS

Como parte de la caracterización se midió y calculó por triplicado el contenido de humedad, de sólidos totales, de cenizas, de sólidos volátiles y de sólidos fijos de acuerdo a la metodología descrita en los puntos 3.5.1, 3.5.2 y 3.5.3 respectivamente, para la semilla de aguacate fresca, así como de la semilla de aguacate después de un mes de haber sido extraída de la fruta, los resultados se muestran en la tabla 8.

*Tabla 8: Caracterización de la semilla de aguacate (%).*

<b>Prueba</b>	<b>Semilla fresca</b>	<b>Semilla al mes de ser extraída</b>
Humedad	54.02 ± 1.94	43.55 ± 0.48
Cenizas	1.03 ± 0.01	1.03 ± 0.01
Sólidos totales	45.97 ± 1.94	56.45 ± 0.48
Sólidos volátiles	45.78 ± 1.94	54.57 ± 0.46
Sólidos fijos	0.19 ± 0.00	1.88 ± 0.06

Los datos son promedio (n=3) ± DE, en %

Para la humedad se obtuvo en promedio un 54.02 ± 1.94 % para la semilla fresca, un 2.3 % abajo de los datos reportados por Avila Rodriguez & Guerrero López (2019), el cual fue de 56.32 ± 0.3 %. Por otro lado, para la semilla extraída después de un mes se obtuvo un resultado de 43.55 ± 0.48 %, con lo cual se observa que la semilla de aguacate se encuentra principalmente formada por agua, además, que el paso del tiempo y el envejecimiento de la semilla favorecen la pérdida de humedad y con ello dificulta el proceso de extracción del almidón, debido a que la semilla se endurece.

Por otro lado, en base a los resultados de la cuantificación de humedad y utilizando la ecuación 2 se determinó el contenido de sólidos totales, dando en promedio  $45.97 \pm 1.94$  % para la semilla de aguacate fresca y  $56.45 \pm 0.48$  % para la semilla de aguacate después de un mes de extraída.

Posteriormente se determinó el contenido de cenizas, obteniéndose que, la semilla de aguacate posee en promedio  $1.03 \pm 0.01$  % de cenizas, asemejándose a los datos reportados por Avila Rodriguez & Guerrero López (2019) cuyos resultados se encuentran  $0.63$  % arriba con un  $1.66 \pm 4.03$  % de ceniza, con lo que se observa que la semilla de aguacate contiene un bajo contenido de residuo inorgánico, mas exactamente de minerales indigestibles. Consecuentemente, con los resultados de la determinación de humedad y de cenizas, se realizó el cálculo para la determinación de sólidos volátiles, dando un resultado de  $45.78 \pm 1.94$  % para la semilla de aguacate fresca y un  $54.57 \pm 0.46$  % para la semilla al mes de ser extraída. Finalmente, los sólidos que se obtienen de la resta de los sólidos totales y los sólidos volátiles son llamados sólidos fijos, de los cuales la semilla fresca presenta en promedio un  $0.19 \pm 0.00$  % y la semilla al mes de su extracción presenta un  $1.88 \pm 0.06$  %. Nuevamente los resultados de los sólidos totales, sólidos volátiles y sólidos fijos presentan concordancia considerando que, como ya se mencionó anteriormente la humedad disminuye con el paso del tiempo, dando lugar a un aumento en el porcentaje de sólidos presentes en la semilla con el paso del tiempo.

#### **4.1.2 DETERMINACIÓN DE ALMIDÓN APARENTE EN LA SEMILLA DE AGUACATE**

Se realizó una determinación cualitativa de la presencia de almidón en la semilla de aguacate por el método de la prueba del yodo de acuerdo a lo descrito en el punto 3.5.4, dando como resultado una coloración azul oscuro o casi negro como se muestra en la figura 19, lo que indica la presencia de almidón en la semilla de aguacate.



*Figura 19: Determinación cualitativa de la presencia de almidón en la semilla de aguacate.*

## 4.2 EXTRACCIÓN DEL ALMIDÓN

### 4.2.1 BALANCE DE MASA GLOBAL Y POR PROCESO DE LA EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE LA SEMILLA DE AGUACATE

A continuación, se presenta un balance de masa global y por proceso en régimen estacionario y sin reacción química basado en la ecuación 11 para el proceso de extracción de almidón de la semilla de aguacate, el cual consistió en alimentar al proceso 100 g de semilla fresca (54 % de humedad) limpia y cortada en trozos con 400 g de agua a 21 °C, la cual pasó por un proceso de molienda de 60 s, filtración, sedimentación y decantación, secado y tamizado, proceso esquematizado en la figura 20, obteniendo los resultados descritos en la tabla 9.

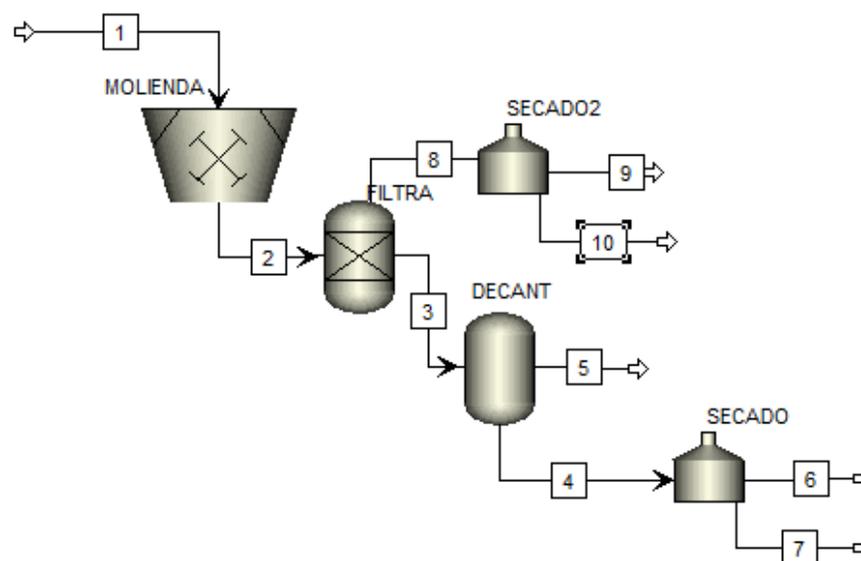


Figura 20: Esquema del proceso de extracción de almidón de la semilla de aguacate.

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \quad (11)$$

Tabla 9: Balance del proceso de extracción de almidón a partir de semilla de aguacate.

	Corr. 1	Corr. 2	Corr. 3	Corr. 4	Corr. 5	Corr. 6	Corr. 7	Corr. 8	Corr. 9	Corr. 10	
Muestra	Semilla (g)	Agua (g)	Bagazo, agua y almidón (g)	Almidón y agua (g)	Almidón húmedo (g)	Agua (g)	Agua (g)	Almidón seco (g)	Bagazo húmedo (g)	Agua (g)	Bagazo seco (g)
1	100	400	500	438	138	300	107.31	30.69	62	40.5	21.5
2	100	400	500	445	140	305	109.41	30.59	55	33.0	22
3	100	400	500	442	144	298	113.14	30.86	58	36.7	21.3
Promedio	100	400	500	441.66	140.67	301	109.96	30.71	58.33	36.73	21.60
	± 0	± 0	± 0	± 3.51	± 3.05	± 3.61	± 2.95	± 0.14	± 3.51	± 3.75	± 0.36

#### 4.2.2 CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE LA EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN Y DE HARINA (MR) DE LA SEMILLA DE AGUACATE

El rendimiento del proceso de extracción nos permite conocer la cantidad de almidón y, en este caso de la harina remanente posterior al proceso de extracción que sirvió como MR para los bioplásticos, que se puede obtener por el proceso descrito y a las condiciones dadas en el punto 4.3.1 (54 % humedad de la semilla, 60 s de molienda, temperatura ambiente (21 °C)), dando como resultado un promedio de  $30.71 \pm 0.14$  % para el almidón, lo que concuerda casi en su totalidad con lo reportado por Chel-Guerrero y col. (2016) con un 29 %. Por otro lado, para el rendimiento del proceso basado en la harina extraída de la semilla se obtuvo un valor promedio de  $21.60 \pm 0.36$  %.

Con los resultados antes mencionados se concluye que la semilla de aguacate es una potencial fuente de almidón, el cual puede ser utilizado para distintas aplicaciones, en este caso para la formación de biopelículas, además de que la obtención tanto del almidón como de la harina por medios mecánicos es bastante sencilla.

Tabla 10: Rendimiento del proceso de extracción.

<b>Muestra</b>	<b>Semilla alimentada (g)</b>	<b>Almidón extraído (g)</b>	<b>Rendimiento en base al almidón (%)</b>	<b>Harina extraída (g)</b>	<b>Rendimiento en base a la harina (%)</b>
1	100	30.69	30.69	21.5	21.5
2	100	30.59	30.59	22.0	22.0
3	100	30.86	30.86	21.3	21.3
Promedio	100 $\pm 0$	30.71 $\pm 0.14$	30.71 $\pm 0.14$	21.6 $\pm 0.36$	21.6 $\pm 0.36$

#### 4.2.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA LA EXTRACCIÓN DEL ALMIDÓN EN EL SOFTWARE STATGRAPHICS

Para el proceso de extracción del almidón se realizó un diseño factorial  $2^3$  mediante el software Statgraphics para identificar los factores de mayor impacto, así como los efectos de interacción de dos y tres factores sobre el rendimiento de la extracción. El diseño en variables independientes codificadas ( $X_i$ ) y reales ( $x_i$ ) se describe en la Tabla 11. Las condiciones de contorno fueron las siguientes:  $x_1$ , temperatura de extracción = 11 - 80 °C;  $x_2$ , % de humedad de la semilla = 38 - 54 %;  $x_3$ , tiempo de molienda = 30 - 120 s.

Tabla 11: Diseño factorial con variables codificadas y reales con el porcentaje de rendimiento como respuesta.

Corrida	Variables codificadas			Variables reales			% Rendimiento			Promedio
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Replica I	Replica II	Replica III	
1	-1	-1	-1	11	38	30	26.97	27.98	27.74	27.56
2	+1	-1	-1	80	38	30	22.99	23.28	22.76	23.01
3	-1	+1	-1	11	54	30	31.98	32.45	32.98	32.47
4	+1	+1	-1	80	54	30	26.54	27.22	26.87	26.88
5	-1	-1	+1	11	38	120	30.65	29.99	31.00	30.55
6	+1	-1	+1	80	38	120	27.78	28.96	27.45	28.06
7	-1	+1	+1	11	54	120	41.87	42.56	39.57	41.33
8	+1	+1	+1	80	54	120	36.13	35.56	35.76	35.82

Los resultados del cálculo de los efectos estimados y las interacciones para el rendimiento (%), así como el error estándar de cada uno de ellos se observan en la tabla 12. El análisis de varianza se observa en la tabla 13.

Tabla 12: Efectos estimados que influyen en el rendimiento (%) de la extracción.

Efecto	Estimación	Error Estándar	V.I.F.
Promedio	30.71	0.146722	
A: Temperatura de extracción	-4.53667	0.293444	1.0
B: Humedad de la semilla	6.82833	0.293444	1.0
C: Tiempo molienda	6.46	0.293444	1.0
AB	-1.01833	0.293444	1.0
AC	0.536667	0.293444	1.0
BC	2.44167	0.293444	1.0
ABC	-0.498333	0.293444	1.0
Bloque	0.58	0.414992	1.33333
Bloque	-0.3875	0.414992	1.33333

Tabla 13: Análisis de varianza para el proceso de extracción del almidón de la semilla de aguacate teniendo el rendimiento (%) como variable de respuesta

Fuente de variabilidad	Suma de Cuadrados	G. L	Media Cuadrática	Relación-F	Valor-P
<u>A: Temperatura de extracción</u>	123.488	1	123.488	239.01	<u>0.0000</u>
<u>B: Humedad de la semilla</u>	279.757	1	279.757	541.48	<u>0.0000</u>
<u>C: Tiempo molienda</u>	250.39	1	250.39	484.64	<u>0.0000</u>
AB	6.22202	1	6.22202	12.04	<u>0.0038</u>
AC	1.72807	1	1.72807	3.34	0.0888
<u>BC</u>	35.7704	1	35.7704	69.23	<u>0.0000</u>
ABC	1.49002	1	1.49002	2.88	0.1116
Bloques	1.04723	2	0.523613	1.01	0.3881
Error Total	7.23318	14	0.516655		
Total (corr.)	707.125	23			

$$R^2 = 98.9771 \%$$

$$R^2_{\text{ajustado por d.f.}} = 98.3195 \%$$

$$\text{Error estándar de Est.} = 0.718787$$

$$\text{Error absoluto medio} = 0.423924$$

Si se toma en cuenta el valor F tomado de tablas de (Montgomery, 2013) (apéndice A), es posible observar que el valor reportado en tablas es de 4.60, por lo que cualquier variable que otorgue un valor menor de F calculada se considera despreciable, con lo cual se concluye que los factores significativos son los siguientes: la temperatura de extracción, el contenido de humedad de la semilla de aguacate, el tiempo de molienda, la interacción entre contenido de humedad de la semilla - Tiempo de molienda y la interacción entre Temperatura de extracción - contenido de humedad de la semilla.

En la figura 21 se muestra el diagrama de Pareto, en el cual podemos observar más a detalle la importancia de las variables principales y de las interacciones, dando como resultado que el orden de importancia de los efectos principales es el siguiente: Contenido de humedad de la semilla > Tiempo de molienda > Temperatura de extracción

Por otro lado, el orden de importancia de las interacciones de los factores es el siguiente:

Contenido de humedad de la semilla - Tiempo de molienda > Temperatura de extracción - Contenido de humedad de la semilla > Temperatura de extracción - Tiempo de molienda > Contenido de humedad de la semilla - Tiempo de molienda – Temperatura de extracción.

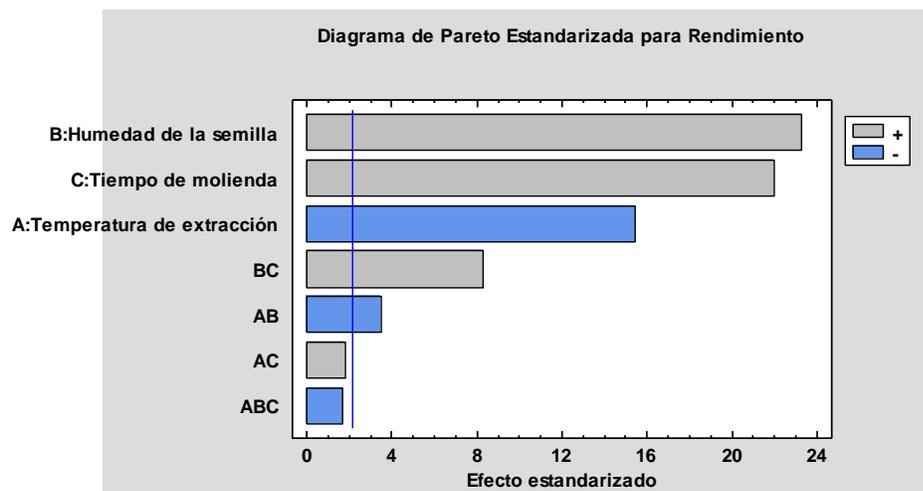


Figura 21: Diagrama de Pareto del diseño factorial para la extracción de almidón de la semilla de aguacate, teniendo como respuesta el rendimiento.

La gráfica de probabilidad, la gráfica de efectos principales y la gráfica de las interacciones se muestran en las figuras 22, 23 y 24 respectivamente, las cuales nos permiten concluir que los efectos principales que proporcionan un mayor rendimiento para este proceso es una temperatura baja, semilla fresca y un tiempo de molienda mayor. Por otro lado, para las interacciones podemos observar que no se produce ningún cruce entre ellas por lo que no son consideradas realmente importantes en el efecto del rendimiento en la extracción del almidón de la semilla.

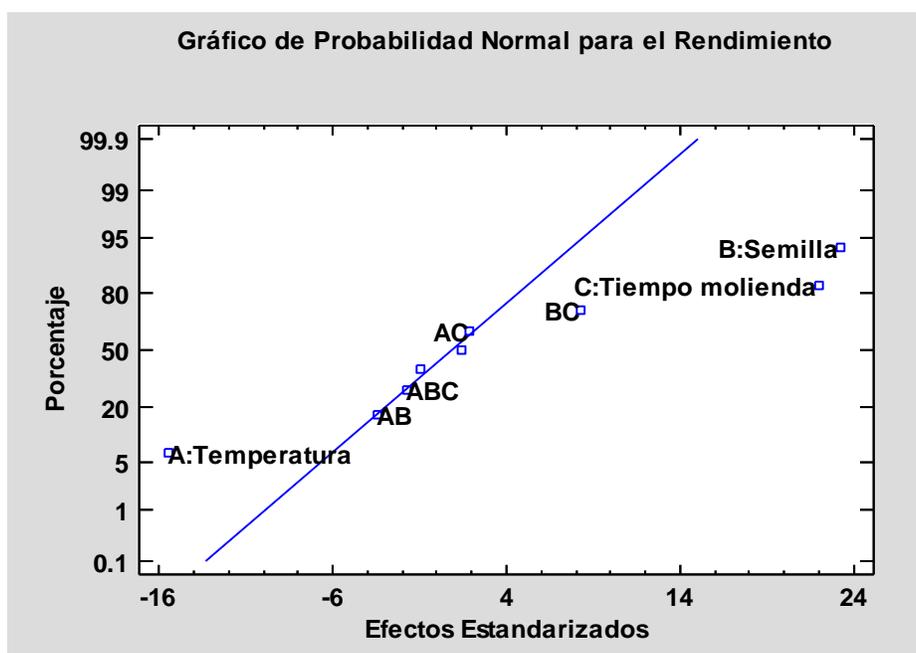


Figura 22: Gráfica de Probabilidad Normal para el Rendimiento.

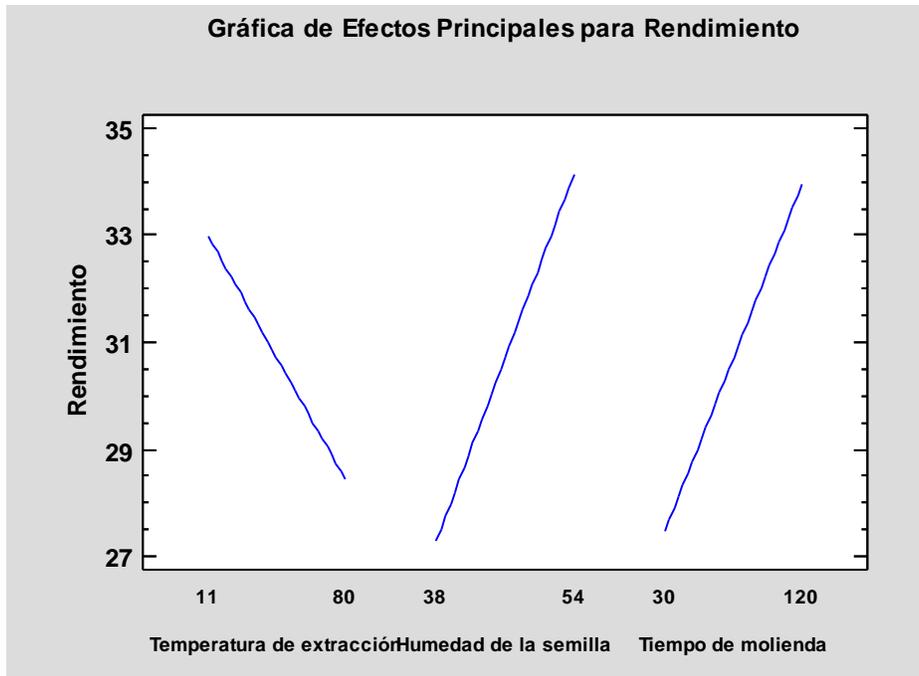


Figura 23: Gráfica de efectos principales.

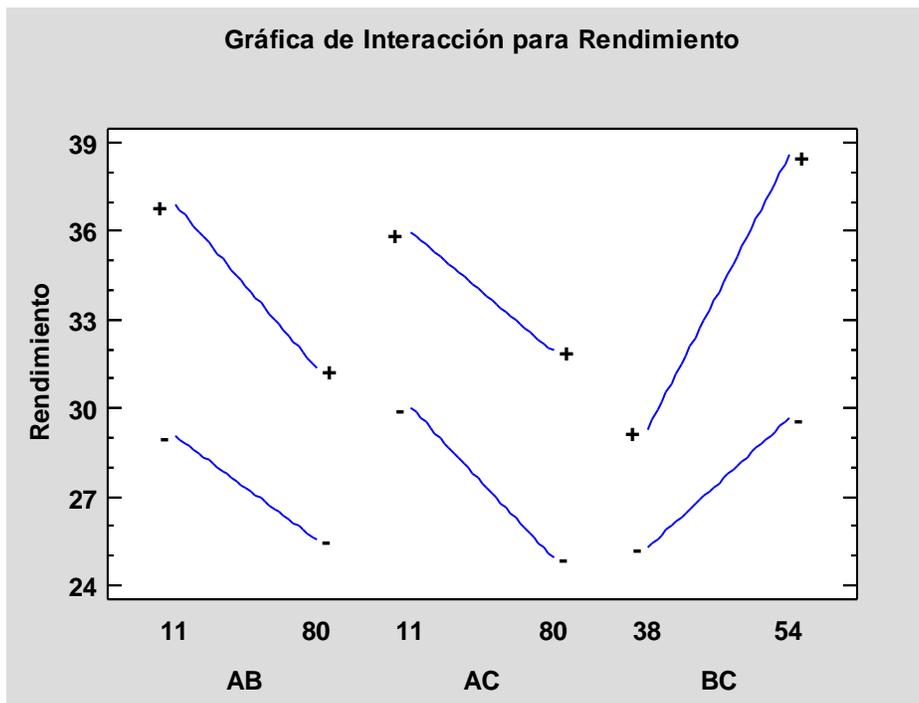


Figura 24: Gráfica de las interacciones

La ecuación del modelo ajustada se presenta mediante la ecuación 12 y los datos de los coeficientes de regresión para el rendimiento presentados en la tabla 14, la cual nos permite conocer el rendimiento del proceso de extracción del almidón a distintas condiciones de operación, cambiando las variables ya mencionadas.

*Tabla 14: Coeficiente de Regresión para el Rendimiento.*

<b>Coeficiente</b>	<b>Estimado</b>
constante	28.9081
A: Temperatura de extracción	-0.0787118
B: Humedad de la semilla	1.50327
C: Tiempo molienda	0.0639136
AB	-0.00272142
AC	0.00017284
BC	0.0344321
ABC	-0.000160494

**La ecuación del modelo ajustado es:**

$$\begin{aligned}
 \text{Rendimiento} = & 28.9081 - 0.0787118 * \text{Temperatura de extracción} + 1.50327 \\
 & * \text{Humedad de la semilla} + 0.0639136 * \text{Tiempo molienda} \\
 & - 0.00272142 * \text{Temperatura de extracción} * \text{Humedad de semilla} \\
 & + 0.00017284 * \text{Temperatura de extracción} * \text{Tiempo molienda} \\
 & + 0.0344321 * \text{Humedad de semilla} * \text{Tiempo molienda} \\
 & - 0.000160494 * \text{Temperatura de extracción} * \text{Humedad de semilla} \\
 & * \text{Tiempo molienda} \quad (12)
 \end{aligned}$$

Por otro lado, el objetivo de este diseño estadístico de experimentos es la optimización de la respuesta, la cual es de 41.33 % a las condiciones presentadas en la tabla 15, las cuales se pueden corroborar con la gráfica de superficie de respuesta estimada (figura 25) y con la gráfica de contorno de la superficie de respuesta estimada (figura 26).

### Optimización de la Respuesta

Objetivo: maximizar el Rendimiento

Valor de rendimiento óptimo = 41.3333

Tabla 15: Respuesta optima.

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura de extracción	11.0	80.0	11.0
Humedad de la semilla	38	54	54
Tiempo molienda	30.0	120.0	120.0

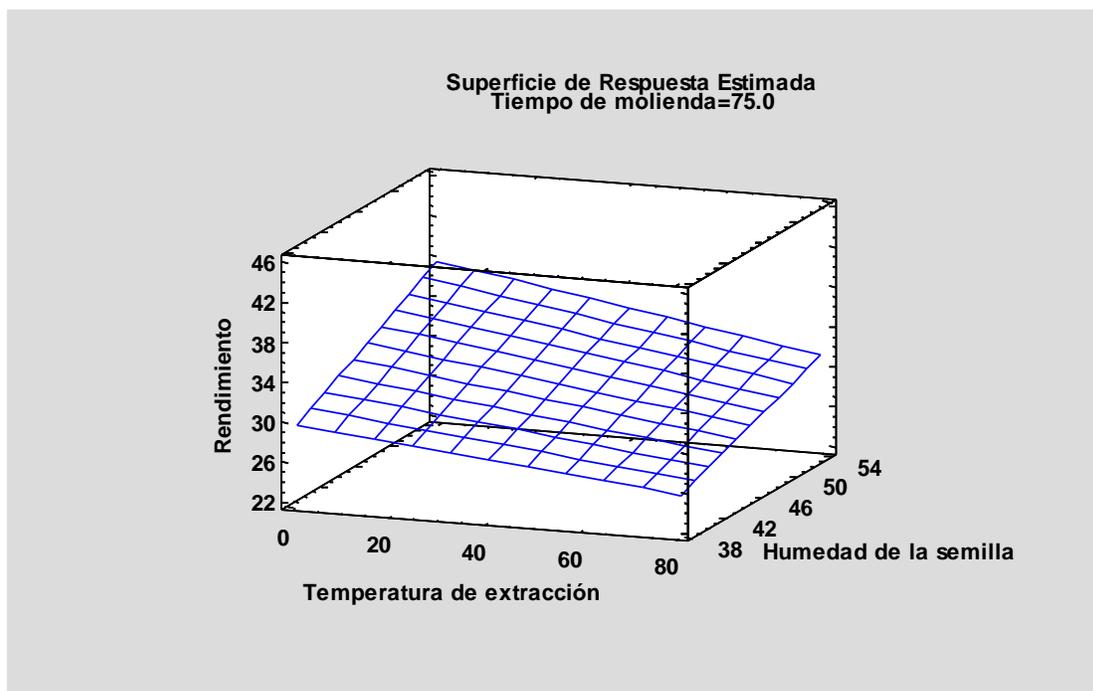


Figura 25: Gráfica de Superficie de Respuesta Estimada.

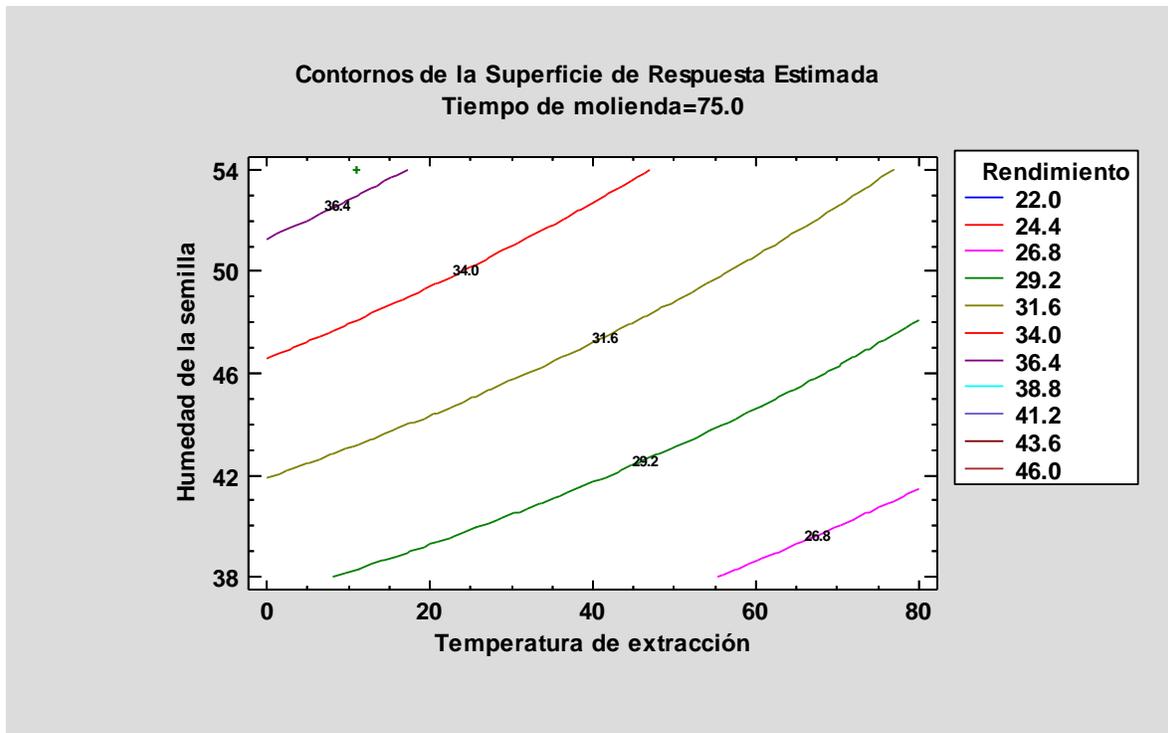


Figura 26: Gráfica de Contorno de la Superficie de Respuesta Estimada

Como podemos observar de acuerdo al diseño de experimentos descrito anteriormente, los factores que más influyen respecto al rendimiento de la extracción del almidón de la semilla de aguacate es en primer lugar el contenido de humedad de la semilla, lo cual se traduce en el nivel de frescura de la misma, como segundo lugar el tiempo de molienda durante la extracción y por último la temperatura durante la extracción. Respecto a las interacciones tenemos que la interacción más importante es el contenido de humedad de la semilla de aguacate y el tiempo de molienda.

Por otro lado, se obtiene que el valor de respuesta mínima es de 23.01 % de rendimiento de extracción a una temperatura de 80°C con 38 % de humedad de la semilla y un tiempo de molienda de 30 s, y, la respuesta óptima fue del 41.33 % de rendimiento, a una temperatura de 11°C con 54 % de humedad de la semilla (semilla fresca) y un tiempo de molienda de 120 s.

### **4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA PARA LA FORMACIÓN DE BIOPLÁSTICOS**

#### **4.3.1 CONTENIDO DE HUMEDAD, DE CENIZAS, DE SÓLIDOS TOTALES. VOLÁTILES Y FIJOS**

Una vez extraído el almidón de la semilla de aguacate, la harina proveniente de dicho proceso sirvió como MR para la fabricación de los bioplásticos, además como otra alternativa se obtuvo bagazo de agave cupreata proveniente del desecho de la fabricación del mezcal, ambos MR se eligieron gracias a su disponibilidad y a su fácil acceso a ellos, además de que pueden ser llevados al tamaño de partícula deseado (malla No. 100 en este caso).

Los resultados se muestran en la tabla 16, como primer punto, se midió por triplicado el porcentaje de humedad de acuerdo a la metodología descrita en el punto 3.5.1, observándose que para el almidón se obtuvo un promedio de  $11.15 \pm 0.09$  %, prácticamente el mismo resultado reportado por Orrego y col. (2020) con un  $11 \pm 1$  %. Para la harina de la semilla de aguacate que sirvió como MR para los bioplásticos es de  $10.74 \pm 0.11$  %, finalmente, el contenido de humedad del bagazo de agave cupreata es en promedio  $8.99 \pm 0.16$  %, resultado parecido al reportado por Uc León (2017) con un promedio de 8.62 %.

Con los resultados del contenido de humedad y en base a la ecuación 2 se calcula el contenido de sólidos totales obteniéndose un  $88.85 \pm 0.09$  % para el almidón, un  $89.26 \pm 0.11$  % para la harina y un  $91.01 \pm 0.16$  % para el bagazo de agave, observando que los materiales antes mencionados poseen un bajo contenido de humedad comparado con el de la semilla de aguacate precursora, con lo que se infiere que gran parte del agua se elimina en el proceso de extracción del almidón.

Posteriormente, se llevó a cabo por triplicado la determinación del contenido de cenizas, obteniéndose que, para el almidón obtenido de la semilla de aguacate se observa un promedio de  $0.51 \pm 0.05$  %, resultado parecido al de Sánchez Banda (2019) con  $0.45 \pm 0.35$  %, lo que demuestra una alta pureza del almidón, al

contener una baja cantidad de residuos inorgánicos, principalmente minerales. Los resultados para la harina proveniente de la semilla de aguacate obtenida después de la extracción del almidón dan en promedio  $1.03 \pm 0.01$  %, resultado que de acuerdo a Peña Alvarez (2010) revela el tipo de refinamiento y molienda, dando un resultado menor que el de una harina de trigo integral con aproximadamente 2 % de cenizas, pero mayor a la harina proveniente del endospermo con 0.3 %. Por otro lado, para el bagazo de agave se observa en promedio un  $12.06 \pm 0.01$  % de cenizas, 4.31 % arriba de los resultados obtenidos por Uc León (2017) con un 7.75 %, con lo que se demuestra que el bagazo de agave contiene un alto contenido de minerales como el calcio y el fósforo.

Con los datos obtenidos de la determinación del contenido de humedad y del contenido de cenizas, además de la ecuación 3 se obtuvo el contenido de sólidos volátiles (SV), dando un promedio de  $88.74 \pm 0.10$  % para el almidón,  $89.05 \pm 0.10$  % para la harina y  $88.40 \pm 0.01$  % para el bagazo de agave cupreata respectivamente.

Finalmente, los sólidos fijos se obtienen mediante el resultado de la resta de sólidos totales y sólidos volátiles, dando en promedio  $0.11 \pm 0.01$  % para el almidón,  $0.21 \pm 0.00$  % para la harina de la semilla y  $2.61 \pm 0.18$  % para el bagazo de agave.

*Tabla 16: Caracterización del almidón, de la harina y del bagazo de agave.*

<b>Prueba</b>	<b>Almidón</b>	<b>Harina semilla de aguacate</b>	<b>Bagazo de agave</b>
Humedad	$11.15 \pm 0.09$	$10.74 \pm 0.11$	$8.99 \pm 0.16$
Cenizas	$0.51 \pm 0.05$	$1.03 \pm 0.01$	$12.06 \pm 0.01$
Sólidos totales	$88.85 \pm 0.09$	$89.26 \pm 0.11$	$91.01 \pm 0.16$
Sólidos volátiles	$88.74 \pm 0.10$	$89.05 \pm 0.10$	$88.40 \pm 0.01$
Sólidos fijos	$0.11 \pm 0.01$	$0.21 \pm 0.00$	$2.61 \pm 0.18$

Los datos son promedio ( $n=3$ )  $\pm$  DE, en %

#### 4.3.2 DETERMINACIÓN DE ALMIDÓN APARENTE (ALMIDÓN, HARINA DE LA SEMILLA Y BAGAZO DE AGAVE)

De igual manera se realizó una determinación cualitativa de la presencia de almidón tanto en el almidón obtenido como en le MR (harina de la semilla y bagazo de agave) por el método de la prueba del yodo de acuerdo a lo descrito en el punto 3.5.4, dando como resultado una coloración azul oscuro o casi negro en el almidón y en la harina de la semilla de aguacate (figuras 27 y 28 respectivamente), lo que indica la presencia de almidón, por el contario para el bagazo de agave (figura 29) no hubo coloración, por lo que aparentemente no contiene almidón.



*Figura 27: Determinación de almidón aparente en el almidón obtenido.*



*Figura 28: Determinación de almidón aparente en la harina de la semilla de aguacate (MR).*



*Figura 29: Determinación de almidón aparente en el bagazo de agave (MR).*

### 4.3.3 DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN AMILOSA/AMILOPECTINA

Se midió por triplicado el contenido de amilosa y de amilopectina de acuerdo a lo descrito en el punto 3.5.6, cuyos resultados se muestran en la tabla 17, dando en promedio un  $19.00 \pm 1.86$  % de amilosa y  $81.00 \pm 1.86$  % de amilopectina, resultado muy parecido a la composición del almidón de yuca con 19.6 % de amilosa y 80.6 % de amilopectina de acuerdo a lo descrito por Chel-Guerrero y col. (2016). Por otro lado, Gaitán Camacho (2009) menciona que la mayoría de los almidones se componen del 10 al 20 % de amilosa y del 80 al 90 % de amilopectina, por lo que el almidón obtenido de la semilla de aguacate se encuentra dentro del rango ya mencionado.

El contenido de amilosa y de amilopectina en los almidones utilizados para la formación de bioplásticos es importante debido a que la amilopectina presenta un grado de polimerización mayor que la amilosa, por lo que un alto contenido de amilopectina favorece la reacción de polimerización como es el caso del almidón obtenido en el presente trabajo de investigación.

*Tabla 17: Contenido de amilosa y amilopectina en el almidón.*

<b>Muestra</b>	<b>Amilosa (%)</b>	<b>Amilopectina (%)</b>
1	17.412	82.59
2	21.04	78.96
3	18.55	81.45
Promedio	$19.00 \pm 1.86$	$81.00 \pm 1.86$

#### 4.3.4 DETERMINACIÓN DE pH DEL ALMIDÓN

Se realizó esta prueba por triplicado mediante la metodología descrita en el punto 3.5.8, dando como resultado un pH de 5, lo cual indica que es ligeramente ácido y que se encuentra dentro del rango de pH de los almidones criollos (5 - 7), tal como se muestra en la tabla 18.

*Tabla 18: pH del almidón extraído de la semilla de aguacate.*

<b>Muestra</b>	<b>pH</b>
1	5
2	5
3	5
Promedio	5 ± 0

### 4.3.5 ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO (IR)

En la figura 30 se observan los espectros IR del almidón (a), del glicerol (b) y de una muestra de bioplástico no reforzado (c), así como sus principales bandas de absorción.

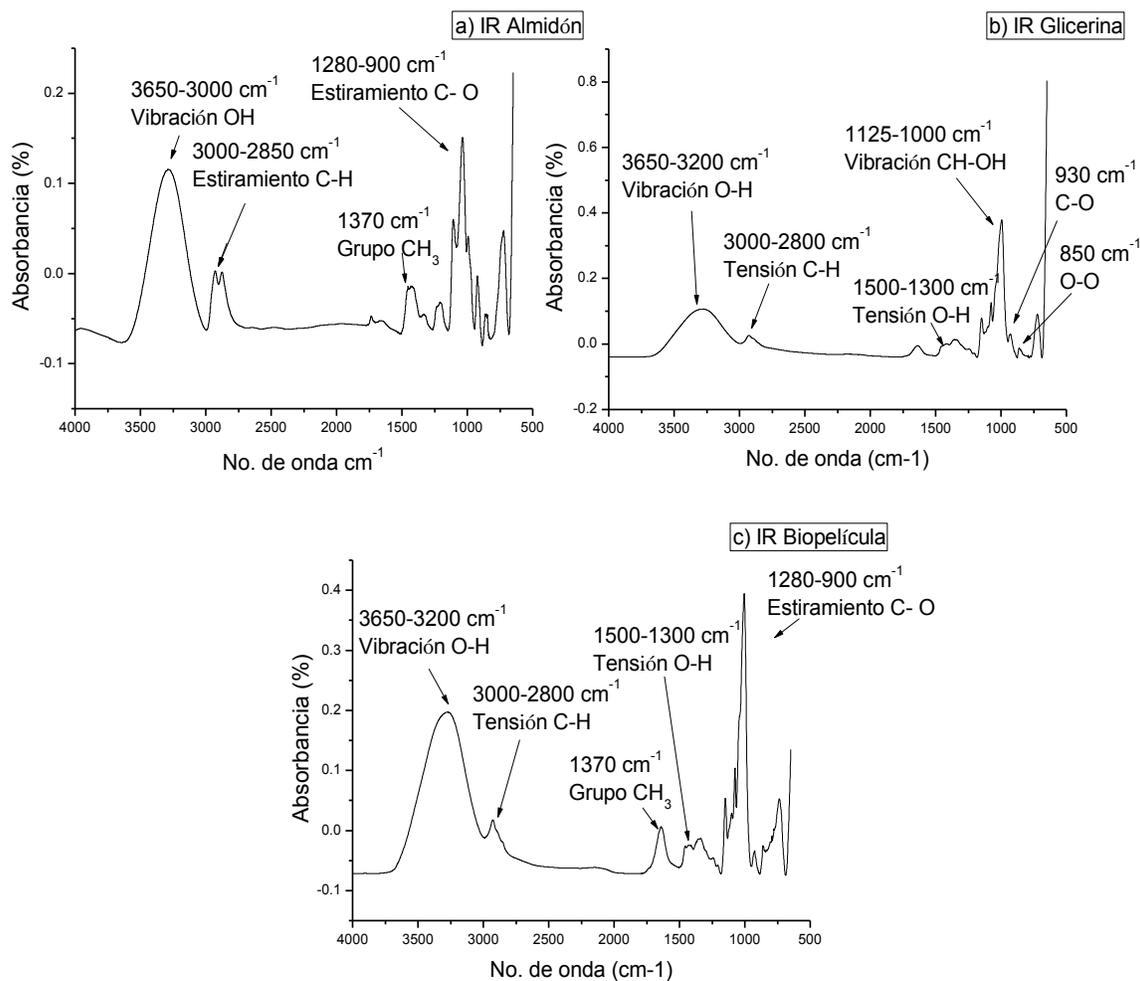


Figura 30: IR del almidón (a), de la glicerina (b) y de una muestra de biopelícula (c)

De acuerdo a lo reportado por Sacithraa y col. (2013) en el almidón extraído, se reporta la presencia de una vibración en el enlace OH generalmente entre las bandas 3,650 y 3,000  $\text{cm}^{-1}$ . Las bandas de estiramiento C – H de los compuestos alifáticos ocurren en el rango de 3,000 – 2,850  $\text{cm}^{-1}$ . Las bandas principales en la región de 2,000 a 1,500  $\text{cm}^{-1}$  se deben al estiramiento C = C y

C = O. Por otro lado, de acuerdo a lo reportado por Torres-Ramírez y col. (2013) se encuentra la presencia del enlace C – O en el intervalo 900 a 1,280  $\text{cm}^{-1}$ , otra señal importante es a 1,370 que corresponde al grupo  $\text{CH}_3$ .

Para la glicerina se observa que, de acuerdo a lo reportado por López Díaz y col. (2018) se encontró que en la banda de 860  $\text{cm}^{-1}$  se encuentra el enlace O - O y en la banda 955  $\text{cm}^{-1}$  se encuentra el enlace C – O. En el intervalo de 1,125 – 1,100  $\text{cm}^{-1}$  se observa la vibración del enlace CH – OH. Por otro lado, en el intervalo de las bandas 1,400 – 1,200  $\text{cm}^{-1}$  se encuentra una deformación en el plano del enlace O -H. finalmente, se encuentra una tensión en el enlace C – H en el intervalo de las bandas 3000-2800  $\text{cm}^{-1}$  y en el intervalo 3,650 – 3,200  $\text{cm}^{-1}$  se encuentra una tensión en el enlace O – H.

Encontrar este tipo de enlaces corrobora que el glicerol o glicerina ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ) se trata de un alcohol terciario con moléculas de carbono, hidrógeno y oxígeno.

Finalmente, se llevó a cabo el IR de una muestra de bioplástico no reforzado, en la que se observan los enlaces principales de sus componentes precursores, los cuales son la glicerina y el almidón.

## 4.4 FORMACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS

### 4.4.1 TEMPERATURA DE GELATINIZACIÓN DEL ALMIDÓN

Se midió la temperatura de gelatinización descrito en el punto 3.5.7, como ya se mencionó este procedimiento es el pretratamiento del almidón para la formación de los bioplástico, cuyos resultados se muestran en la tabla 19, el cual en promedio es de  $85.33 \pm 0.58$  %, resultado parecido al reportado por Sánchez Banda L. (2020) con 85 %.

La temperatura obtenida es una temperatura relativamente baja y fácil de trabajar ya que algunos almidones gelatinizan a temperaturas mayores a  $110$  °C, lo que dificulta su transformación debido a la evaporación del agua, por otro lado, se observó que a temperaturas arriba de  $90$  °C comienza la degradación y quemado del almidón.

*Tabla 19: Temperatura de gelatinización del almidón*

<b>Muestra</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
1	85
2	85
3	86
Promedio	85.33 $\pm 0.58$

#### 4.4.2 CANTIDAD DE AGUA FAVORABLE PARA LA FORMACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS

Se realizaron distintas corridas para determinar la cantidad de agua adecuada para la formación de las biopelículas (tabla 20), en este caso se tomó una relación 1:1 de almidón-glicerina y se dejó fijo el 10 % de ácido acético, con lo cual se encontró que debajo del 60 % de agua el almidón no se disuelve completamente y la pasta formada (si se forma) no es homogénea, por otro lado, a mayor cantidad de agua mayor tiempo de secado, por lo que lo más favorable es disolver en 60 % de agua (figura 31).

Tabla 20: Cantidad de agua favorable para la formación de bioplásticos.

Muestra	Almidón (%)	Glicerina (%)	Ácido acético (%)	Agua (%)
1	4.5	4.5	10	80
2	9.5	9.5	10	70
3	14.5	14.5	10	60
4	19.5	19.5	10	50
5	24.5	24.5	10	40
6	29.5	29.5	10	30
7	34.5	34.5	10	20



Figura 31: Pasta formada a la temperatura de gelatinización.

#### 4.4.3 FORMACIÓN DE BIOPLÁSTICOS NO REFORZADOS

Una vez obtenida la relación de almidón – agua favorable para la formación de los bioplásticos se realizaron distintas corridas por triplicado, cuyas relaciones se muestran en la tabla 21, variando la relación almidón – agente plastificante (glicerina) y dejando fijo el porcentaje del modificador químico (ácido acético) para encontrar las relaciones que produzcan la formación de biopelículas, las figuras 32, 33 y 34 indican que para las muestras 1, 2 y 3 respectivamente se tiene un exceso de glicerina, con lo que no se producen correctamente las biopelículas, por otro lado, las figuras 35, 36, 37 y 38 muestran que aparentemente las formulaciones de las muestras 4, 5, 6 y 7 proporcionan una correcta formación de las biopelículas, por último, las figuras 39 y 40 que corresponden a las muestras 8 y 9 muestran un exceso de almidón, por lo que al levantar la biopelícula esta se deshace, dando como resultado que la incorporación de plastificante reduce la fragilidad del bioplástico.

*Tabla 21: Condiciones para la formación de los bioplásticos.*

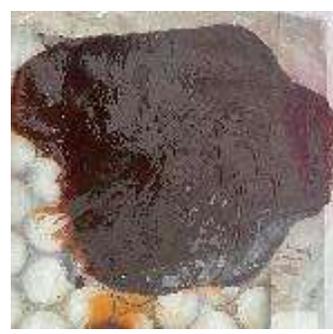
<b>Muestra</b>	<b>Almidón Semilla de Aguacate (%)</b>	<b>Glicerina (%)</b>	<b>Ácido Acético (%)</b>
1	10	80	10
2	20	70	10
3	30	60	10
4	40	50	10
5	45	45	10
6	50	40	10
7	60	30	10
8	70	20	10
9	80	10	10



*Figura 322: Muestra 1 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.*



*Figura 33: Muestra 2 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.*



*Figura 34: Muestra 3 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.*



*Figura 355: Muestra 4 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.*



*Figura 36: Muestra 5 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.*



*Figura 37: Muestra 6 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.*



*Figura 38: Muestra 7 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.*



*Figura 39: Muestra 8 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.*



*Figura 40: Muestra 9 para la formación de la biopelícula al tercer día de su elaboración.*

#### 4.4.4 FORMACIÓN DE BIOPLÁSTICOS REFORZADOS

En base a los resultados del punto 4.4.3 se realizaron distintas formulaciones para la formación de las películas, variando la relación almidón - MR y la relación almidón - agente plastificante, las cuales se muestran en la tabla 22, las primeras 4 formulaciones son correspondientes a bioplásticos no reforzados, de la muestra 5 a la 24, son bioplásticos reforzados con harina de la semilla de aguacate, de la muestra 25 a la 40 son materiales reforzados con bagazo de agave y como resultados preliminares se obtuvo que, para las formulaciones de las muestras de la 41 a la 44 con bagazo de agave como MR no pudieron elaborarse, debido a que las biopelículas resultaron bastante quebradizas, estas formulaciones fueron utilizadas para la realización de ensayos mecánicos.

Tabla 22: Formulaciones para biopelículas reforzadas.

<b>Muestra</b>	<b>Almidón (%)</b>	<b>Glicerina (%)</b>	<b>Ácido Acético (%)</b>	<b>MR (%)</b>
1	40	50	10	0
2	45	45	10	0
3	50	40	10	0
4	60	30	10	0
5	39	50	10	1
6	44	45	10	1
7	49	40	10	1
8	59	30	10	1
9	35	50	10	5
10	40	45	10	5
11	45	40	10	5
12	55	30	10	5
13	30	50	10	10
14	35	45	10	10
15	40	40	10	10
16	50	30	10	10

17	25	50	10	15
18	30	45	10	15
19	35	40	10	15
20	45	30	10	15
21	20	50	10	20
22	25	45	10	20
23	30	40	10	20
24	40	30	10	20
25	39	50	10	1
26	44	45	10	1
27	49	40	10	1
28	59	30	10	1
29	35	50	10	5
30	40	45	10	5
31	45	40	10	5
32	55	30	10	5
33	30	50	10	10
34	35	45	10	10
35	40	40	10	10
36	50	30	10	10
37	25	50	10	15
38	30	45	10	15
39	35	40	10	15
40	45	30	10	15
41	20	50	10	20
42	25	45	10	20
43	30	40	10	20
44	40	30	10	20

#### 4.4.5 ENSAYOS MECÁNICOS EN LOS BIOPLÁSTICOS

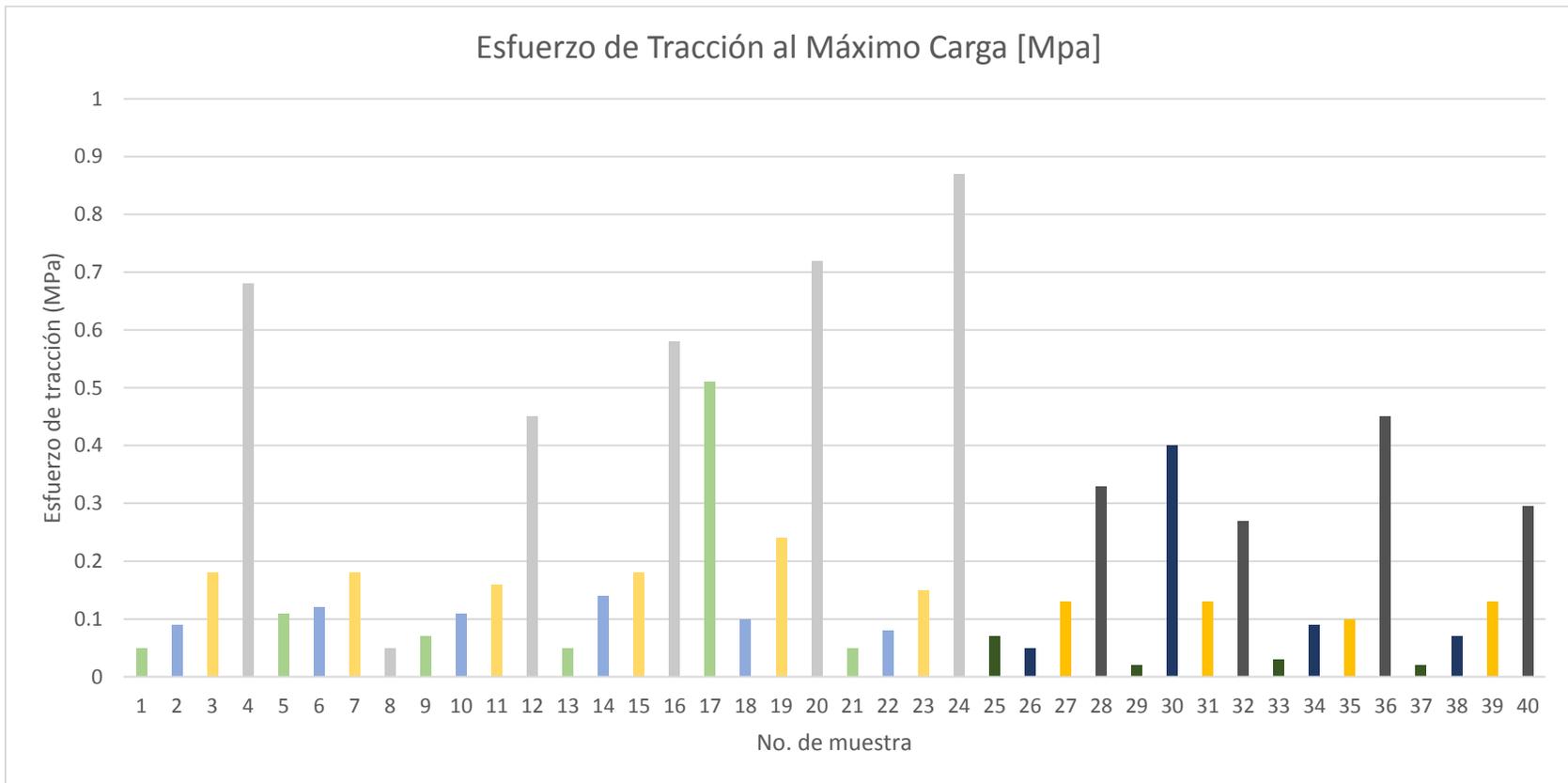
Se realizaron los ensayos mecánicos para las biopelículas no reforzadas, las biopelículas reforzadas con harina de la semilla de aguacate y para las biopelículas reforzadas con bagazo de agave, de acuerdo a la formulación mostrada en la tabla 22, cuyos resultados generales se muestran en la tabla 23.

*Tabla 23: Ensayos mecánicos a los bioplásticos*

<b>No. de muestra</b>	<b>Esfuerzo Tracción al Máximo Carga [Mpa]</b>	<b>Esfuerzo Tracción a Fluencia (Pendiente cero) [Mpa]</b>	<b>Deformación por tracción (Extensión) a Fluencia (Pendiente cero) [%]</b>	<b>Deformación por tracción (Extensión) a Rotura (Estándar) [%]</b>	<b>Módulo (Automático de Young) [MPa]</b>
1	0.05	0.05	17.9	19.32	0.36
2	0.09	0.09	20.59	21.75	0.59
3	0.18	0.18	21.14	22.79	1.2
4	0.68	0.68	22.31	25.42	5.67
5	0.11	0.11	21.12	22.89	0.7
6	0.12	0.12	14.43	15.5	1.13
7	0.18	0.18	12.6	13.48	2.1
8	0.05	0.05	7.39	8.16	0.93
9	0.07	0.07	16.63	17.71	0.49
10	0.11	0.11	18.57	20.66	0.81
11	0.16	0.16	18.02	20.2	1.26
12	0.45	0.45	20.13	18.51	3.56
13	0.05	0.05	9.47	10.61	0.73
14	0.14	0.14	14.36	15.69	1.37
15	0.18	0.18	7.47	8.6	3.35
16	0.58	0.58	16.14	18.36	6.93

17	0.51	0.51	14.01	16.12	6.39
18	0.1	0.1	9.43	10.64	1.71
19	0.24	0.24	13.68	14.81	2.83
20	0.72	0.72	11.76	13.86	12.49
21	0.05	0.05	10.99	12.16	0.62
22	0.08	0.08	16.39	16.99	0.76
23	0.15	0.15	15.24	16.3	1.51
24	0.87	0.87	11.56	13.12	15.79
25	0.07	0.07	21.9	24.19	0.43
26	0.05	0.05	22.93	25.44	0.27
27	0.13	0.13	10.22	15.89	1.36
28	0.33	0.33	10.76	12.26	4.63
29	0.02	0.02	10.33	12.02	0.28
30	0.4	0.04	9.91	11.25	0.55
31	0.13	0.13	17.6	19.38	1.04
32	0.27	0.27	13.7	15.56	3.06
33	0.03	0.03	10.11	11.72	0.48
34	0.09	0.09	9.28	10.24	1.33
35	0.1	0.1	7.84	8.79	1.85
36	0.45	0.45	18.52	22.64	4.45
37	0.02	0.02	6.32	8.28	0.5
38	0.07	0.07	9.68	10.77	1.03
39	0.13	0.13	11.6	12.95	1.61
40	0.296	0.296	10.762	12.354	4.152

La figuras 41 y 42 se muestran las gráficas de los resultados para el ensayo de tracción y para el módulo automático o de Young, en las cuales podemos observar que el bioplástico con mejores resultados fue el número 24 con 0.87 MPa para el ensayo de tracción, un resultado relativamente alto comparado al de otros bioplásticos, como es el caso del obtenido a base de almidón de maíz de García Quiñones (2015), el cual dio un resultado de 0.31 MPa y, respecto al módulo de Young se obtuvo un resultado de 15.79 MPa. Por otro lado, se observa que los resultados al esfuerzo de tracción, así como el módulo automático o módulo de Young en la mayoría de los casos son directamente proporcionales a la cantidad de almidón en la mezcla y, por lo tanto, inversamente proporcionales al porcentaje de agente plastificante (glicerina) añadido, corroborando lo reportado por Tarique, J. y col. (2021), el cual indica que la resistencia a la tracción y el módulo en biopelículas a base de almidón plastificadas con glicerina se reduce significativamente. También, los resultados arrojan que la harina extraída a base de la semilla de aguacate es un mejor MR que el bagazo de agave ya que en general, no se obtuvieron buenos resultados en los biopolímeros reforzados con bagazo de agave, dando incluso un mejor resultado el bioplástico número 4, el cual no posee refuerzo alguno.



*Figura 41: Ensayo a la tracción de los bioplásticos.*

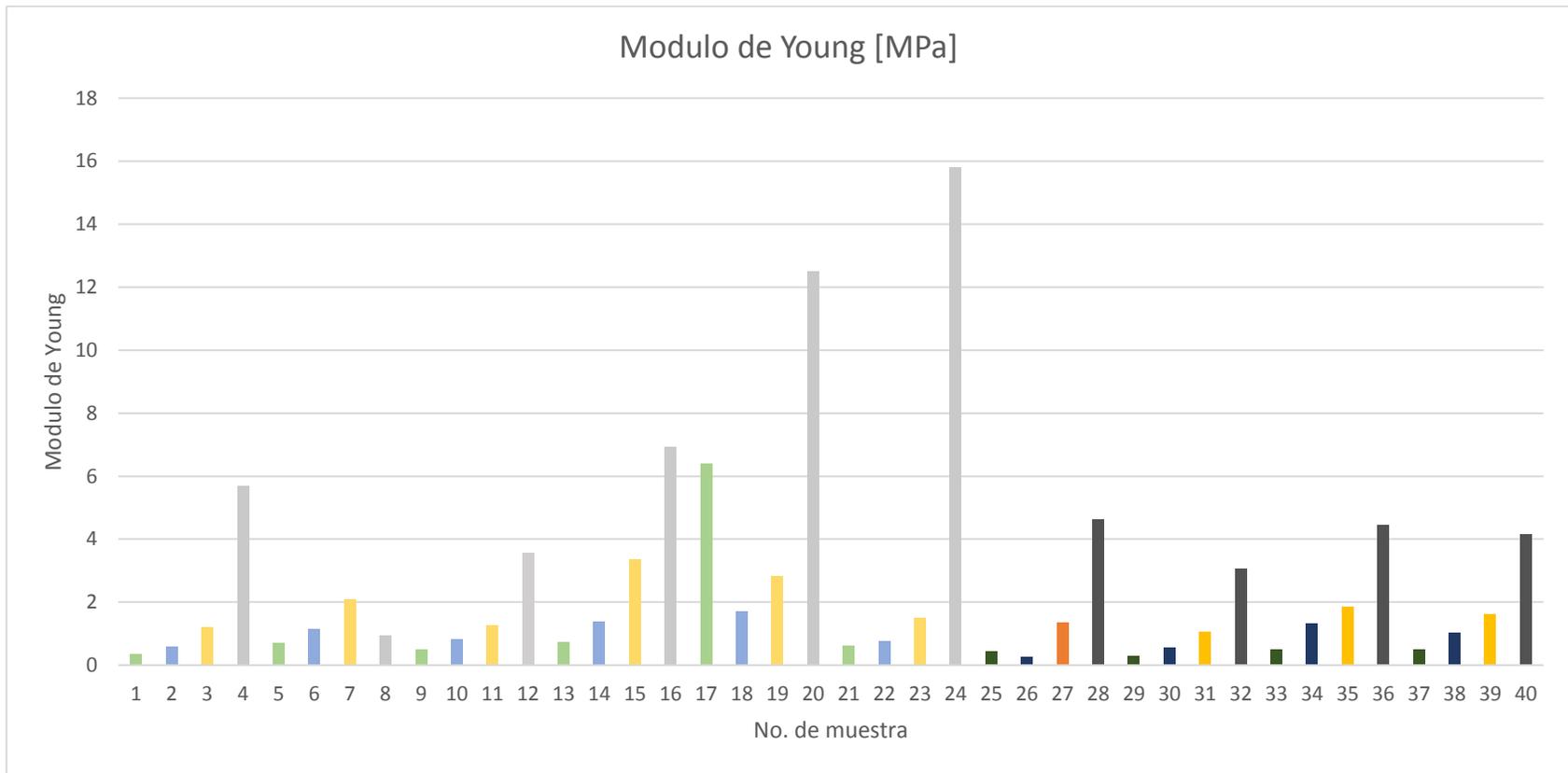


Figura 42: Resultados para el módulo de Young de las biopelículas.

#### 4.4.6 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS BIOPLÁSTICOS

De acuerdo a los resultados de la determinación de la densidad de los biopolímeros mostrada en la tabla 24 y comparándola con la tabla 25 se concluye que la densidad del biopolímero plástico resultante es muy comparable a la de los termoplásticos convencionales hechos a base del petróleo, esencialmente a la del polietileno, con lo que se infiere que los bioplásticos presentan propiedades físicas similares a las de los plásticos.

*Tabla 24: Densidad de los bioplásticos.*

<b>Muestra</b>	<b>Masa del biopolímero (g)</b>	<b>Volumen desplazado de agua (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
1	5.23	5.6	0.94
2	5.16	5.5	0.94
3	6.11	6.4	0.96
Promedio	5.50 ± 0.53	5.83 ± 0.49	0.94 ± 0.01

*Tabla 25: Densidad de algunos termoplásticos.*

<b>Siglas</b>	<b>Material</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
	Caucho de silicona	0.8
PP	Polipropileno	0.85-0.92
LDPE	Polietileno de baja densidad	0.89-0.93
	Caucho natural	0.92-1.0
HDPE	Polietileno de alta densidad	0.94-0.98
PA	Nailon 12	1.01-1.04
ABS	ABS Copolímeros de acrilonitrilo-butadieno-estireno	1.04-1.06
PS	Poliestireno	1.04-1.08
EP	Resinas epoxi	1.1-1.4
PMMA	Polimetacrilato de metilo	1.16-1.20
PVC	PVC plastificado (40%)	1.19-1.31
CA	Acetato de celulosa	1.25-1.35

#### 4.4.7 MEDICIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA Y DE LA SOLUBILIDAD EN AGUA DE LOS BIOPLÁSTICOS

Se realizaron en el mismo ensayo la medición de la absorción de agua y de la solubilidad en agua de los bioplásticos de acuerdo a las metodologías descritas en los puntos 3.5.13 y 3.5.14 respectivamente y con la ecuación No. 9, dando los resultados mostrados en la tabla 26.

*Tabla 26: Absorción de agua*

Muestra	Peso					
	0 h	2h	4 h	6 h	8 h	24 h
1	0.11	82.37	83.73	83.87	82.07	81.16
2	0.11	81.39	84.30	85.64	84.52	81.78
3	0.11	79.07	78.51	79.99	80.67	77.88
4	0.16	67.82	72.59	72.72	72.76	69.96
5	0.11	81.86	84.53	85.61	84.19	80.11
6	0.11	79.24	79.26	78.29	75.64	74.13
7	0.11	79.84	80.54	81.20	80.07	77.76
8	0.09	79.79	79.84	79.28	79.10	74.60
9	0.11	80.09	80.16	79.95	79.89	73.89
10	0.15	78.86	80.04	81.26	79.24	74.68
11	0.14	77.44	77.59	76.72	75.04	71.43
12	0.13	59.69	59.88	63.23	54.07	59.88
13	0.11	76.14	76.54	79.18	74.02	62.01
14	0.16	74.16	74.20	72.59	74.00	65.06
15	0.12	58.95	58.76	62.46	61.80	59.13
16	0.15	70.68	71.42	69.77	66.89	63.31
17	0.12	66.56	66.66	67.93	67.99	64.24
18	0.14	71.56	69.67	69.71	61.46	57.90
19	0.11	74.48	73.42	71.91	71.61	69.61
20	0.13	70.48	70.09	69.01	69.35	67.70

21	0.10	77.70	78.53	75.91	77.57	75.28
22	0.14	78.62	78.75	78.04	76.94	72.97
23	0.12	75.19	73.07	72.39	71.88	68.54
24	0.14	65.83	66.80	64.88	65.58	63.43
25	0.13	87.36	83.19	82.67	80.71	74.55
26	0.12	88.72	90.46	88.06	86.68	81.28
27	0.14	78.71	77.58	75.50	73.94	68.35
28	0.16	68.45	65.57	63.21	63.70	59.90
29	0.12	90.42	88.99	83.27	83.88	76.58
30	0.14	83.07	78.89	78.08	74.76	68.00
31	0.19	78.53	75.85	70.48	70.26	60.41
32	0.12	67.51	65.33	63.77	62.62	57.67
33	0.15	68.48	68.98	68.08	54.89	49.24
34	0.12	82.41	76.79	75.97	74.60	68.51
35	0.12	71.42	70.64	69.72	67.80	61.24
36	0.15	68.50	66.71	66.67	58.34	53.21
37	0.12	63.02	62.93	60.19	57.94	51.88
38	0.11	82.37	78.39	76.63	75.23	74.03
39	0.16	67.33	63.07	63.67	60.62	58.75
40	0.16	54.76	51.85	51.71	50.63	49.42

---

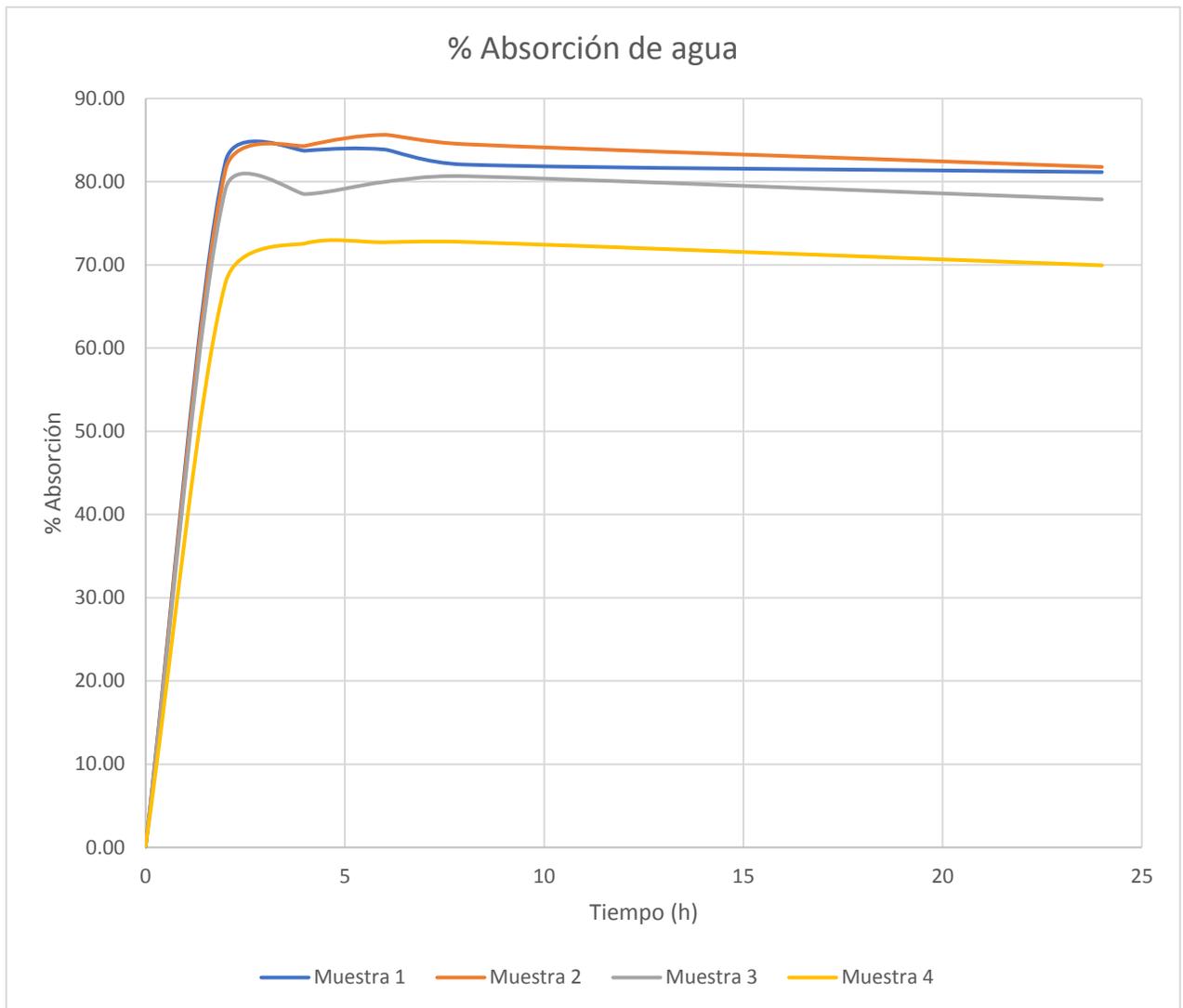
Se observa que los bioplásticos obtenidos a base de semilla de aguacate una gran absorción de agua desde el inicio de la prueba (del 50 -90 %), lo cual podría limitar sus aplicaciones ya que tendrían que ser utilizados para fines donde se expongan a medios con poca presencia de agua.

En la gráfica de la figura 43 se observa más a detalle que el bioplástico No. 4 es el que menos absorbe agua durante todo el proceso, además, es menos soluble en agua, es decir, es el que presenta mejores condiciones del grupo de los no reforzados.

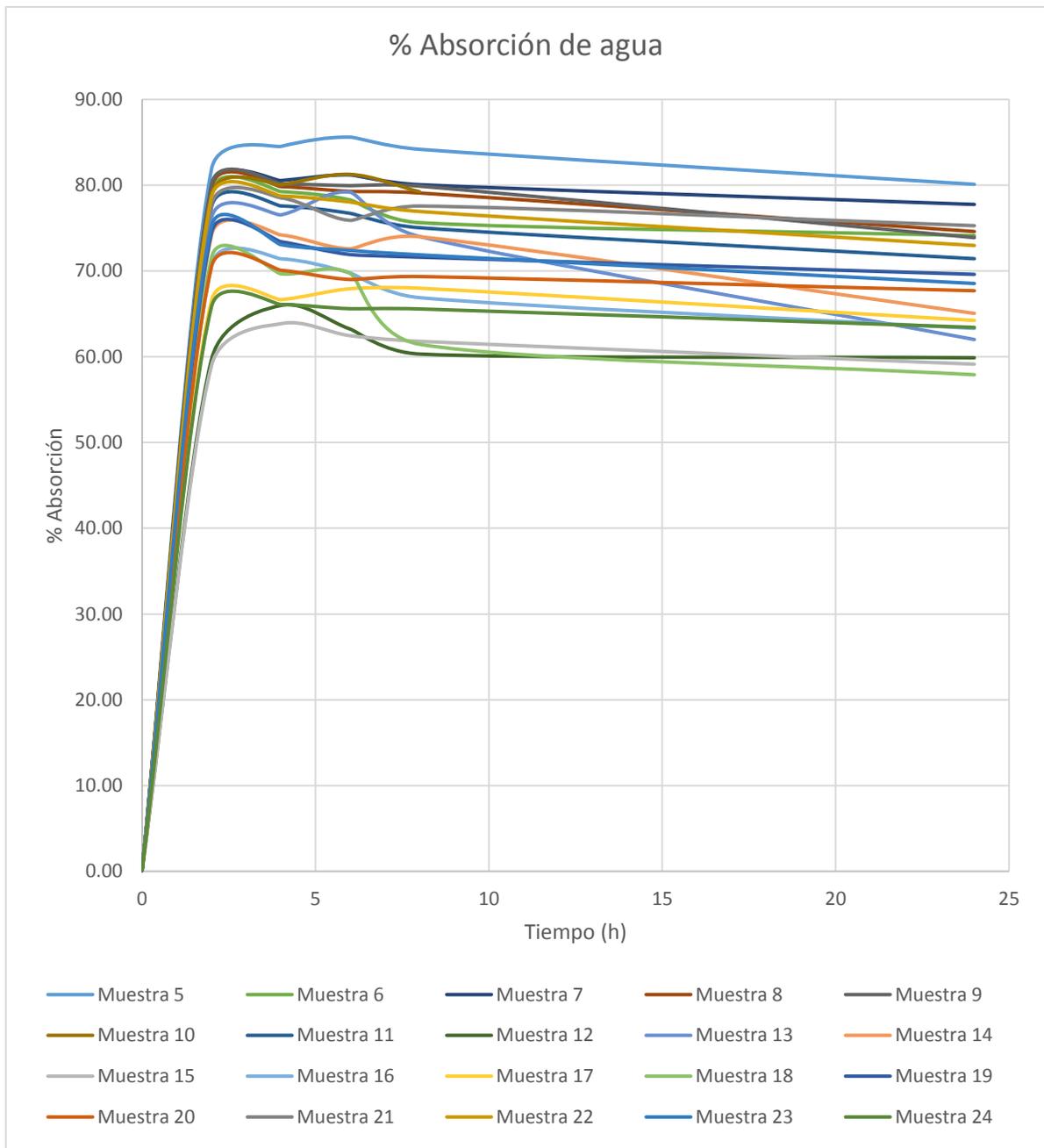
Para el grupo de los bioplásticos reforzados con harina de la semilla de aguacate se observa en la gráfica de la figura 44 que el bioplástico que presenta menor absorción de agua fue el No. 15, pero el que presenta una menor solubilidad es el No. 24, si se observan los datos de solubilidad de agua del bioplástico No. 24 nos podemos dar cuenta que también presenta un bajo índice de absorción, por lo que se infiere que la muestra No. 24 presenta mejores resultados en estos ensayos.

Para el grupo de los bioplásticos reforzados con bagazo de agave podemos observar en la gráfica de la figura 45 que este grupo presenta una mayor solubilidad en agua que los dos anteriores, además en este grupo el bioplástico que menor absorción presentó fue el No. 40.

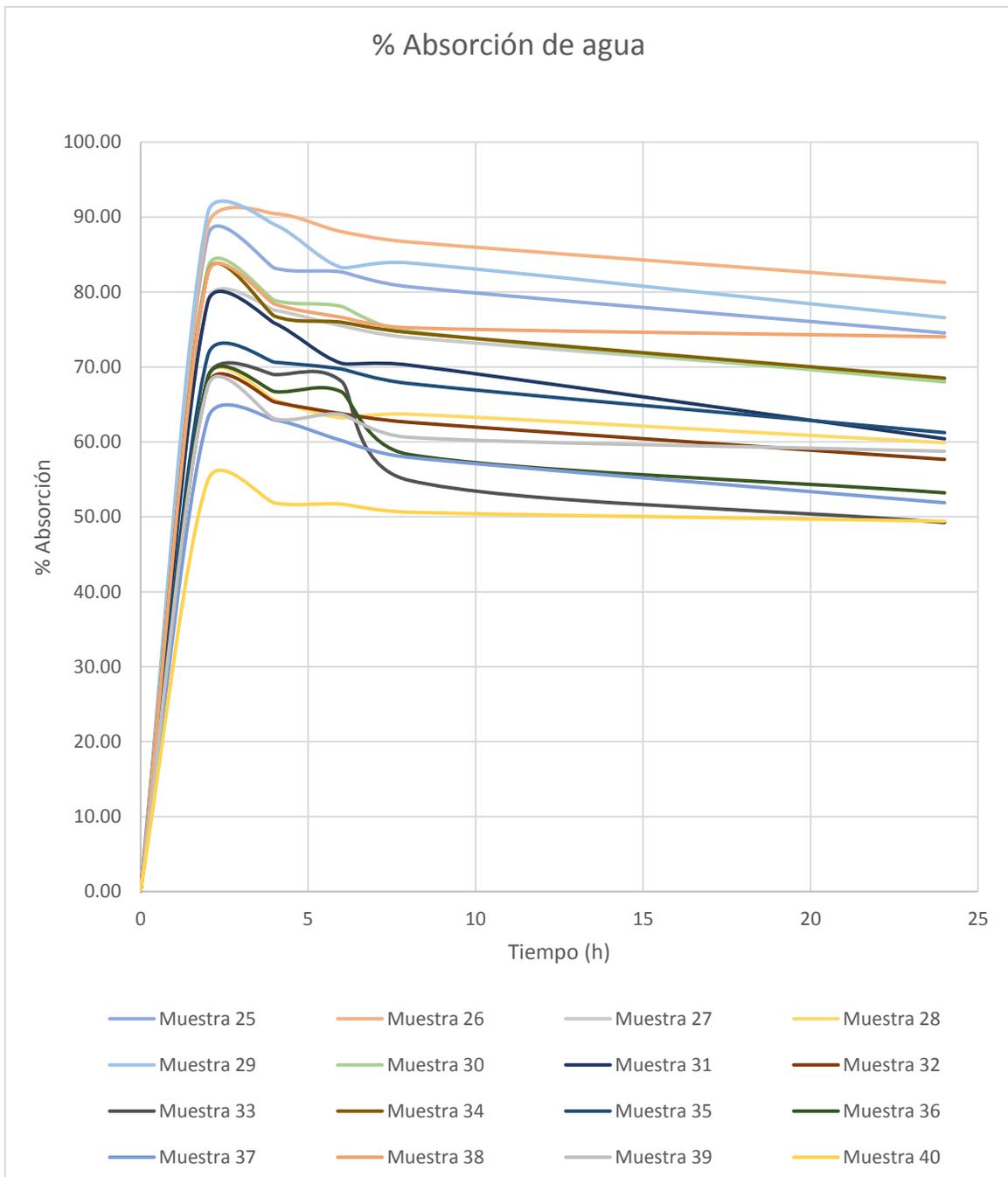
Finalmente, es posible observar que en los bioplásticos reforzados con harina de la semilla de aguacate y con bagazo de agave una mayor cantidad de carga de partículas de MR proporciona una menor cantidad de absorción de agua, además, en cada grupo con la misma cantidad de material de refuerzo se observa que la cantidad de almidón influye en el porcentaje de absorción, resultando que en la mayoría de las muestras una mayor cantidad de almidón disminuye la absorción, lo cual se comprueba en las biopelículas 24 y 36, que se componen por la mayor cantidad de almidón de su grupo (40 %), así como de MR (20 %).



*Figura 43: Porciento de absorción de agua para bioplásticos no reforzados.*



*Figura 44: Resultados para el módulo de Young de las biopelículas.*



*Figura 45: Porciento de absorción de agua para bioplásticos reforzados con bagazo de agave.*

Por otro lado, se midió el porcentaje de solubilidad de los bioplásticos. En la figura 46 se observa que la solubilidad depende directamente del contenido de almidón, ya que si se separan los bioplásticos por grupos de acuerdo al contenido de MR (de 4 en 4) se obtienen bloques con distinta relación almidón – agente plastificante y con la variable almidón – MR fija, con lo que es posible concluir que, en general, una mayor cantidad de almidón en la muestra proporciona un menor porcentaje de solubilidad, ayudando a mejorar las propiedades de barrera de las muestras. Además, se observa que las muestras con bagazo de agave como MR presentan una mayor cantidad de solubilidad. Finalmente, se puede obtener las relaciones que proporcionan la muestra menos soluble, es decir, la muestra 24 con 40 % de almidón, 30 % de agente plastificante (glicerina) y 20 de MR (harina de la semilla de aguacate), mostrando una solubilidad de  $18.61 \pm 0.01$  %.

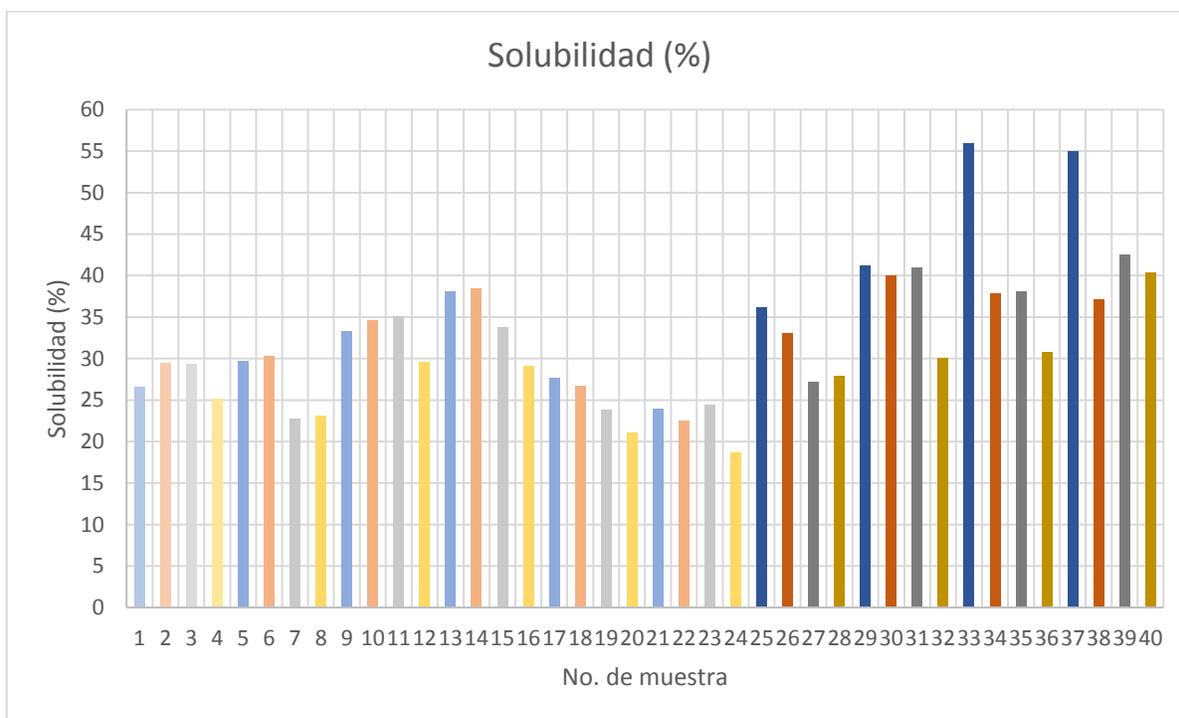


Figura 46: Solubilidad de los bioplásticos.

#### 4.4.8 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD DE LAS BIOPELÍCULAS CON MEJORES RESULTADOS

Se determinó por triplicado el contenido de humedad para las biopelículas que proporcionaron mejores resultados mecánicos, las cuales fueron la No. 4 para las biopelículas no reforzadas, la No. 24 para las reforzadas con harina de aguacate y la No. 36 para las reforzadas con bagazo de agave, cuyos resultados se observan en la tabla 27, para las cuales se obtuvieron los siguientes resultados: Para la biopelícula No. 4 se obtuvo  $25.46 \pm 0.25$  %, para la biopelícula No. 24 se obtuvo  $25.72 \pm 0.39$  % y para la película No. 36 se obtuvo un resultado de  $22.07 \pm 1.46$ , resultados superiores a los reportados por Navia-Porras & Bejarano-Arana (2014) para bioplásticos elaborados con harina de yuca con  $11 \pm 0.5$  % de humedad. Finalmente se observa que, las biopelículas no reforzadas y las biopelículas reforzadas con harina de la semilla de aguacate tienen porcentaje de humedad parecido debido a que ambas provienen de la semilla de aguacate, en cambio, la biopelícula reforzada con bagazo de agave dio un porcentaje de humedad menor.

Este resultado es importante, debido a que el porcentaje de humedad es indicativo del grado de biodegradabilidad, teniendo una relación directamente proporcional, en este caso es posible inferir que el tiempo de degradación en general es relativamente lento y más en los bioplásticos reforzados con bagazo de agave.

Tabla 27: Contenido de humedad en los bioplásticos.

Muestra	Humedad (%)
4	$25.46 \pm 0.25$
24	$25.72 \pm 0.39$
36	$22.07 \pm 1.46$

#### **4.4.9 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE DEGRADACIÓN DE LOS BIOPLÁSTICOS**

En las gráficas de las figuras 47, 48 y 49 se observan los porcentajes de degradación de los bioplásticos que fueron enterrados a 30, 60 y 90 días respectivamente, después de iniciada la prueba, durante el primer mes todos los bioplásticos presentaron porcentajes de degradación en al menos 27 %, para el segundo mes los bioplásticos no reforzados se encontraron a más del 67 % de degradación, y el resto a más del 60 %, finalmente, para el tercer mes todos los bioplásticos reforzados con harina de la semilla de aguacate presentaron degradación en su totalidad y los reforzados con bagazo de agave se degradaron a más del 90 %, con lo que se concluye que los bioplásticos presentados en este proyecto de investigación son compostables ya que según la norma un bioplástico compostable es aquel que se biodegrada en un medio de compost.

En las figuras 50, 51 y 52 se muestran las gráficas que corresponden a la degradación a los 2, 4 y 6 meses de los biopolímeros que se dejaron a la intemperie, nuevamente se observa que los biopolímeros no reforzados fueron los que sufrieron mayor porcentaje de degradación, seguidos por los biopolímeros reforzados con harina de la semilla de aguacate y, por último, los biopolímeros reforzados con bagazo de agave, sin embargo, al sexto mes todos los biopolímeros presentaron degradación por arriba del 90 %, con lo que se comprueba que las muestras son biodegradables de acuerdo a la norma ASTM D-5488.

Como conclusión general se tiene que los biopolímeros no reforzados presentan una mayor degradación, seguido por los reforzados con harina de semilla de aguacate y por ultimo los reforzados con bagazo de agave, debido a que el bagazo de agave es un material más estable que la harina de la semilla de aguacate. Por otro lado, se comprueba lo descrito por Sernaqué Auccahuasi y col. (2020), que la relación entre el volumen de glicerina y el porcentaje de degradación son directamente proporcionales, observándose que si se queda fija la relación almidón – MR y solo se varia la relación almidón – agente plastificante,

las muestras con mayor cantidad de glicerina tuvieron un proceso de degradación más rápido, debido a que la glicerina reduce las fuerzas intermoleculares del almidón permitiendo que el ataque de microorganismos sea mayor.

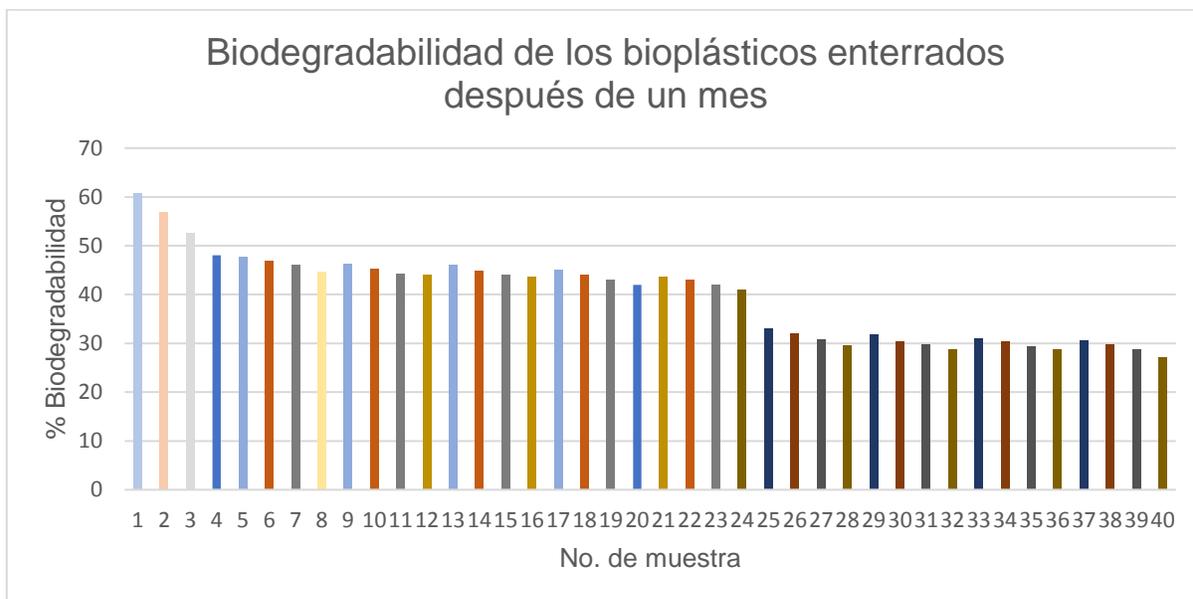


Figura 47: Biodegradabilidad de los bioplásticos enterrados al mes.

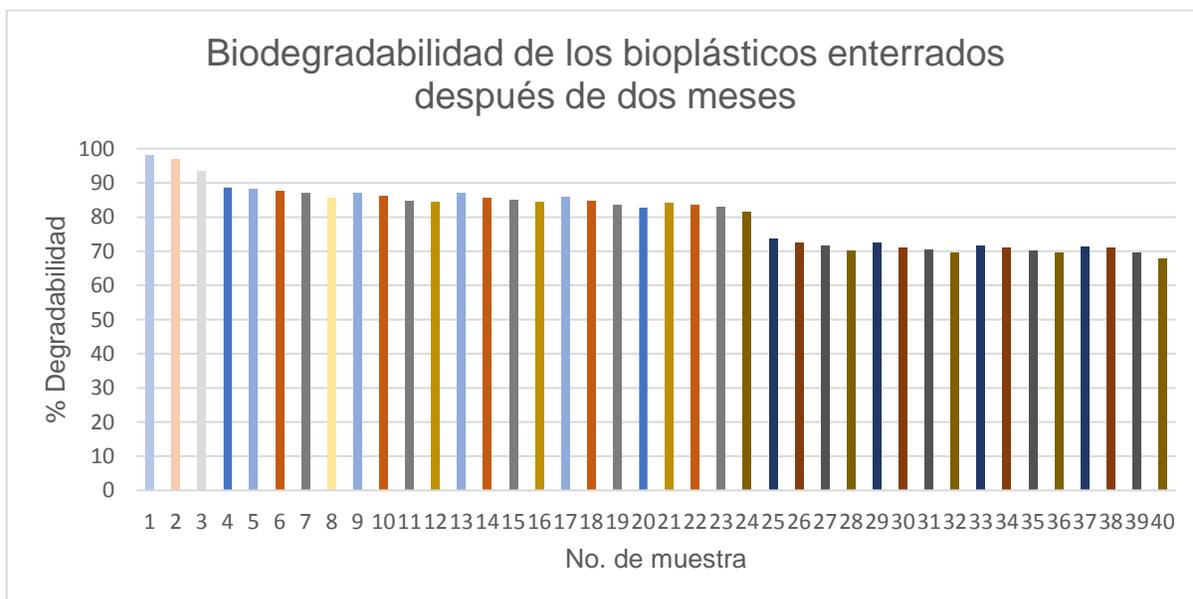


Figura 48: Biodegradabilidad de los bioplásticos enterrados a los dos meses.

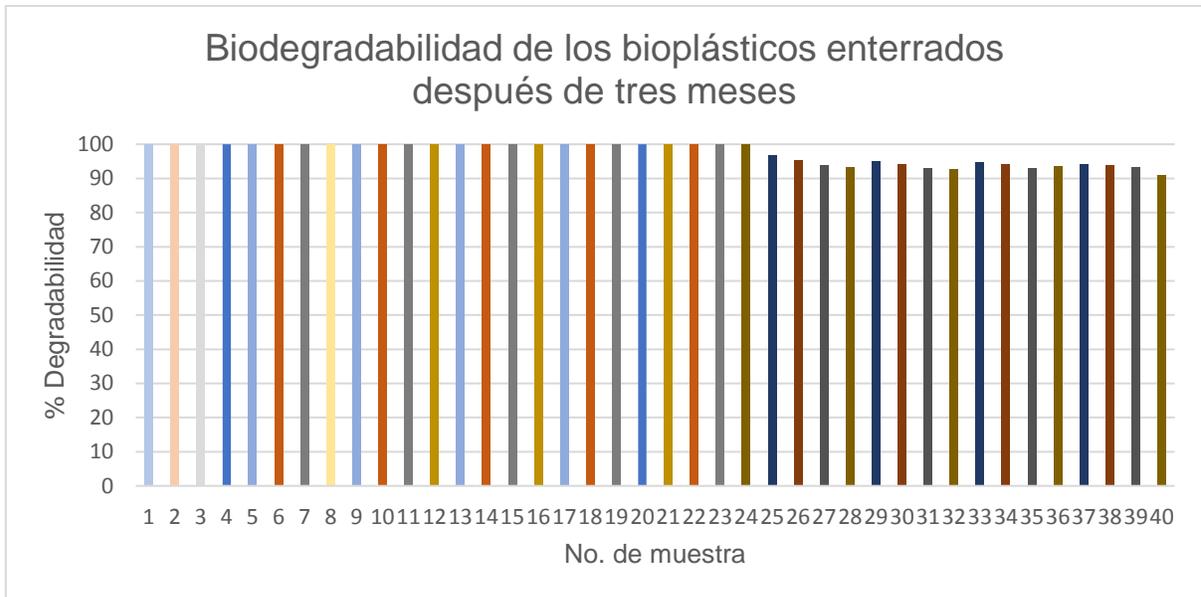


Figura 49: Biodegradabilidad de los bioplásticos enterrados a los tres meses.

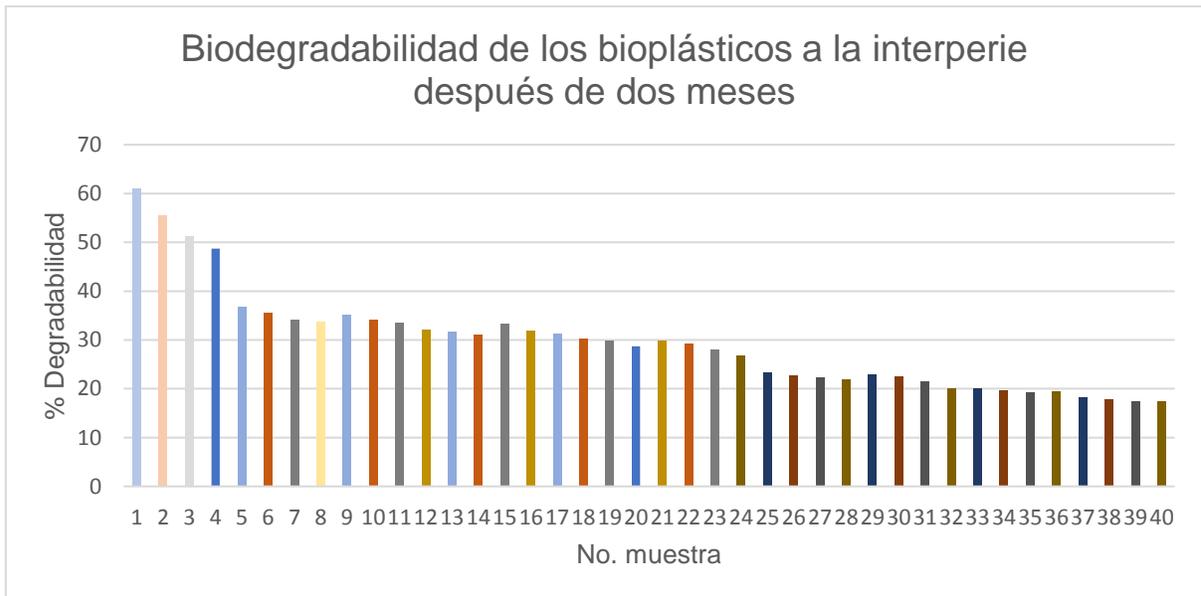


Figura 50: Biodegradabilidad de los bioplásticos a la intemperie a los dos meses.

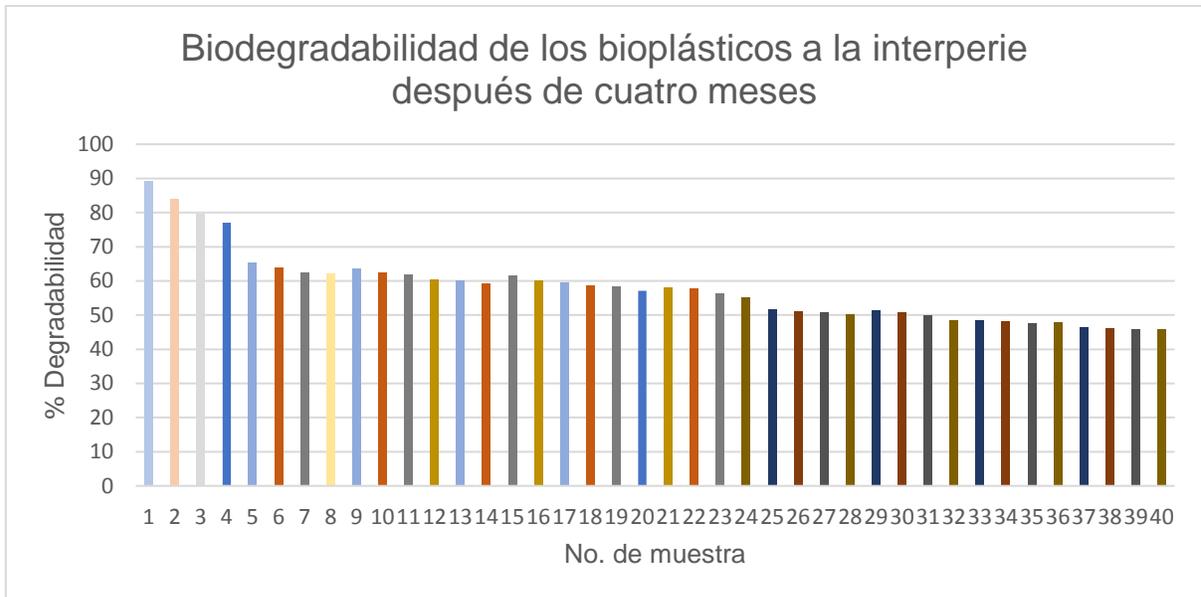


Figura 51: Biodegradabilidad de los bioplásticos a la intemperie a los cuatro meses.

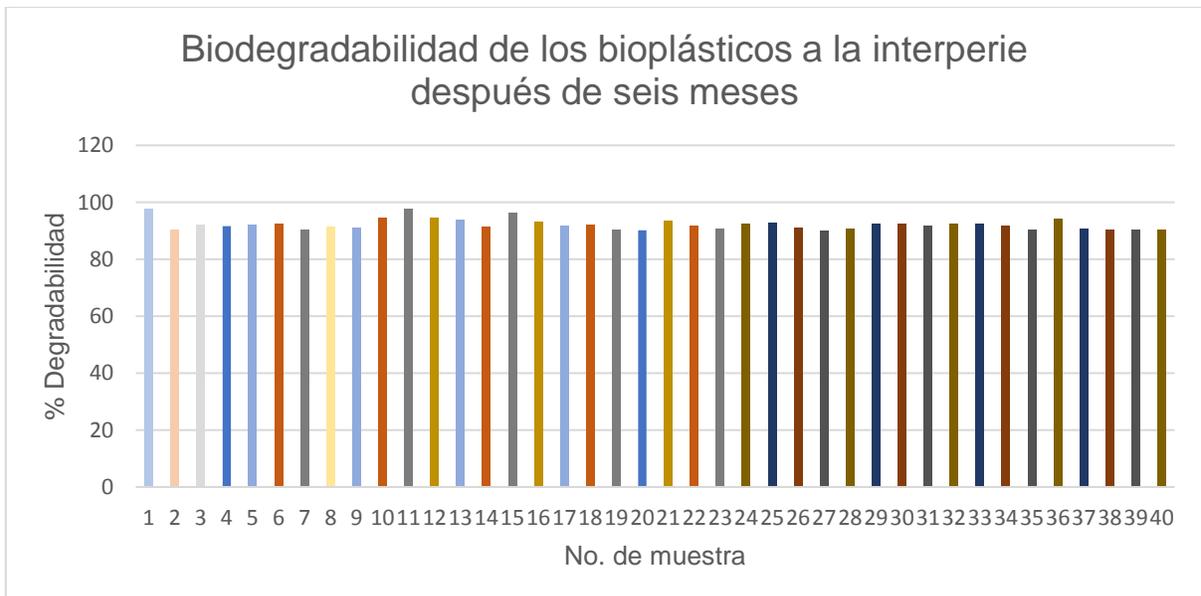


Figura 52: Biodegradabilidad de los bioplásticos a la intemperie a los seis meses.

# **CAPÍTULO 5:**

## **CONCLUSIONES**

---

En este apartado se presentarán las conclusiones obtenidas durante este proyecto de investigación.

## 5.1 CONCLUSIONES

A partir del uso del desecho agroindustrial (semilla de aguacate y bagazo de agave) se obtuvieron bioplásticos biobasados, biodegradables y compostables elaborados a base de almidón extraído de la semilla de aguacate por el método de polimerización por condensación, con distintas relaciones almidón - agente plastificante y almidón - material de refuerzo, de entre los cuales presentó mejores propiedades mecánicas, de degradación, de solubilidad y de absorción la biopelícula con 40 % almidón – 30 % agente plastificante – 10 % ácido acético (modificador químico) y 20 % de material de refuerzo, destacándose la semilla de aguacate como material de refuerzo.

El diseño de experimentos para determinar la importancia de los efectos de los factores sobre el rendimiento de extracción determina que el factor que más efecto tiene sobre este proceso es el contenido de humedad de la semilla, seguido del tiempo de molienda y, por último, la temperatura, encontrando un valor de respuesta óptima del 41.33 %.

## **5.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS A FUTURO**

- 5.2.1 Realizar el procedimiento descrito en el presente documento para otros almidones con composición similar de amilosa y amilopectina.
- 5.2.2 Evaluar el uso de otros desechos agroindustriales para la elaboración de biopolímeros.
- 5.2.3 Realizar análisis económico para el proceso descrito en esta tesis.
- 5.2.4 Proporcionar un uso para el bioplástico elaborado que permita sustituir materiales de un solo uso.

# **CAPÍTULO 6:**

## **BIBLIOGRAFÍA**

---

En este capítulo se muestra la bibliografía en la cual se basó el presente trabajo de investigación.

## 6.1 BIBLIOGRAFÍA

1. ADAPT. (28 de 02 de 2020). *Normativas Y Regulaciones Para Polímeros Biodegradables Y Compostables*. Obtenido de Adapt Compounding: <http://adapt.mx/es/normativas-y-regulaciones-para-polimeros-biodegradables-y-compostables/>
2. Agarwal, S. (2021). Major factors affecting the characteristics of starch based biopolymer films. *European Polymer Journal*, 160, 110788.
3. Aimplas. (2019). Clasificación e identificación de materiales plásticos.
4. Aldabe S., B. C. (2004). En “*Química 2 química en acción*” . (págs. 256-264). Buenos Aires, Argentina : Ed. Colihue.
5. Alexandrova, L. (2003). Polímeros, un mundo aparte. *Materiales avanzados*(1), 7-14.
6. Alvarado Hernández , J. M. (28 de 06 de 2019). *Plastificantes* . Obtenido de CONTYQUIM: <https://contyquim.com/blog/plastificantes>
7. Amaya-Pinos, J. B. (2019). Estudio de la dosificación del almidón extraído del banano en un polímero de tipo termoplástico. *Colomb. Quim*, 48(1), 43-51.
8. Angel. (23 de 04 de 21). *Los Materiales Compuestos* . Obtenido de <https://www.rimfyq.com/2021/04/los-materiales-compuestos.html>
9. Anjum N., F. A. (2016). Biodegradable film from mango kernel starch: Effect of plasticizers on physical, barrier, and mechanical properties. *Starch Journal*, Vol. 68, 919-928.
10. AproxymaPlastics. (2019). *CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES PLÁSTICOS*. Obtenido de <https://aproxymaplastics.com/plasticos/clasificacion-de-los-materiales-plasticos/>
11. ASTM E1755-01 “Standard Method for the Determination of Ash in Biomass” In 2003. (s.f.).
12. Avellán, A., Diaz, D., Mendoza , A., Zambrano, M., Zamora , Y., & Riera, M. A. (2020). OBTENCIÓN DE BIOPLÁSTICO A PARTIR DE ALMIDÓN DE MAÍZ (*Zea mays* L.)(Obtaining bioplastic from corn starch (*Zea mays* L.)). *Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 7(1), 1-11.
13. Avila Rodriguez, F. A., & Guerrero López , K. B. (2019). *Obtención de un conservante natural a partir de la semilla de aguacate variedad Hass*

(*Persea Americana Mill.*). Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América Facultad de Ingenierías Programa de Ingeniería Química.

14. Bolaños, L., & Alvarez, L. (2018). Polímeros conductores: aplicaciones en celdas fotovoltaicas y dispositivos electrónicos. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 34(1), 18-38.
15. Bollaín Pastor, C., & Vicente Agulló, D. (2020). Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública. *Revista Española de Salud Pública*, 93, e201908064.
16. Castro Pérez, C. V. (2020). Avances en la ciencia y tecnología de los polímeros. *VirtualPro*.
17. Cauich Rodríguez, J. V. (2020). CELEBRANDO 100 AÑOS DE LA CIENCIA DE LOS POLÍMEROS Y SU IMPACTO EN LOS BIOMATERIALES. *Sociedad Polimérica de México A. C.*
18. Ceballos P., A. M., & Montoya B., S. (2013). Evaluación química de la fibra en semilla, pulpa y cáscara de tres variedades de aguacate. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustria*, 11(1), 103-112.
19. Chapuel Terapuez, A. Y., & Reyes Suárez, J. X. (2019). *OBTENCIÓN DE UNA PELÍCULA BIODEGRADABLE A PARTIR DE LOS ALMIDONES DE SEMILLA DE AGUACATE (Persea americana Mill) Y BANANO (Musa acuminata AAA) PARA EL RECUBRIMIENTO DE PAPAYA*. Guayaquil: UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL.
20. Chel-Guerrero, L., Barbossa-Martín, E., Martínez-Antonio, A., González-Mondragón, E., & Betancur-Ancona, d. (2016). Some physicochemical and rheological properties of starch isolated from avocado seeds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 86, 302-308.
21. Conde, M. (10 de 03 de 2020). *Plásticos Commodities: Los invencibles*. Obtenido de Ambiente Plástico: <https://www.ambienteplastico.com/plasticos-commodities-los-invencibles/>
22. Corkery, M., & Sengupta, S. (2021). Here Is Who's Behind the Global Surge in Single-Use Plastic. *The New York Times*.
23. Cornejo Arteaga, P. M. (2016). Aplicaciones de los Polímeros. *Con-Ciencia Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 3*, 3(5).
24. Curiosoando.com. (26 de noviembre de 2019 ). "¿Qué es un polímero? Definición, polimerización y ejemplos". Obtenido de <https://curiosoando.com/que-es-un-polimero>
25. Diaz, A. (2021). Producción mundial de plástico 1950-2019. *Statista*.

26. DOW. (s.f.). *Polímeros y Compuestos Especializados*. Obtenido de <https://www.dow.com/es-es/product-technology/pt-specialty-polymers-compounds.html>
27. Ecoplas. (Junio de 2020). *¿Qué son los plásticos Biodegradables, Biobasados, Degradables, Oxodegradables, Compostables?* Obtenido de Ecoplas Plásticos y medioambiente: <https://ecoplas.org.ar/2016/wp-content/uploads/2020/06/Publicacion-54-Plasticos-Biodegradables.pdf>
28. Encalada, K., Aldás, M. B., Proaño, E., & Valle, V. (2018). An overview of starch-based biopolymers and their biodegradability. *Ciencia e Ingeniería*, 39(3), 245-258.
29. Enríquez C., M., Velasco M., R., & Ortiz G., V. (2012). Composición y procesamiento de películas biodegradables basadas en almidón. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(1).
30. Escribano Cajo, V. M. (2020). *DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN BIOPLASTICO A PARTIR DE CÁSCARA DE MARACUYÁ (Passiflora edulis)*. Pimentel: Universidad Señor de Sipán.
31. Flores Rubio, D. A. (2020). *Trabajo de Fin de Máster "Aprovechamiento por Extracción de compuestos polifenólicos del hueso de aguacate tipo Hass subproducto en la industria del guacamole"*. Jaén : Universidad de Jaén.
32. Flores Villa E., S. G. (2019). Polymeric compounds and their applications. *CienciaAcierta Revista científica, tecnológica y humanística* .
33. Fombuena Borrás, V., Fenollar Gimeno, O. Á., & Montañés Muñoz, N. (2016). Clasificación de los polímeros . En *Caracterización de materiales poliméricos* (págs. 8-12). Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.
34. Gaitán Camacho, J. A. (2009). *Obtención, caracterización y comparación de almidón termoplástico a partir de almidón de yuca y maíz*. Bogotá.
35. Galego-Fernández, N., & Rozsa-Galego, C. (2018). Ciencia de los Polímeros en la Universidad de la Habana. *Revista Cubana de Química*, 30-32.
36. García Quiñones, A. V. (2015). *Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz*. El Salvador.
37. González García, J. C. (2018). *Desarrollo de un polímero biodegradable a partir de almidón de semilla de ataco, Amaranthus quitensis L.* Lima, Perú.
38. González, E. (2011). *Lacelulosa y el almidón dos polímeros naturales*. Obtenido de [portalacademico.cch.unam.mx](http://portalacademico.cch.unam.mx):

<https://portalacademico.cch.unam.mx/materiales/prof/matdidac/sitpro/exp/quim/quim2/quimllvallejo/almidonycelulosa.pdf>

39. Greelane.com. (2019). Obtenido de <https://www.greelane.com/es/ciencia-tecnolog%c3%ada-matem%c3%a1ticas/ciencia/what-are-examples-of-polymers-604299/>
40. GREENPEACE. (2019). "Datos sobre la producción de plásticos". *Plásticos*.
41. Gutiérrez Valencia, T. M., Chito Trujillo, D. M., & Cuervo Ochoa, G. (2019). Introducción a la química de los polímeros . En *Polímeros Generalidades y tendencias de investigación en Colombia* (págs. 13-29). Colombia : Editorial Universidad del Cauca.
42. Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L., & Zeng, E. Y. (2020). A global perspective on microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(1), e2018JC014719.
43. Halimatul, M. J., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Ilyas, R. A. (2019). Water absorption and water solubility properties of sago starch biopolymer composite films filled with sugar palm particles. *Polimery*, 64.
44. Heydari, A., Alemzadeh, I., & Vossoughi, M. (2013). Functional properties of biodegradable corn starch nanocomposites for food packaging applications. *Mater Design*, 50, 954-961.
45. <https://www.visocym.com/>. (22 de 10 de 2021). *Clasificación de los materiales compuestos según la forma de los constituyentes*. Obtenido de <https://www.ventadefrpenmexico.com/2021/10/22/clasificaci%C3%B3n-de-los-materiales-compuestos-seg%C3%BAn-la-forma-de-los-constituyentes/>
46. Huda, E., Rahmi, & Khairan. (2019). "Preparation and characterization of cellulose acetate from cotton. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci*, 364(1).
47. Ingemecanica. (2019). *Estudio de los Materiales Compuestos*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>
48. Jaso Sánchez, M. A. (s.f.).
49. Labeaga Viteri, A. (2018). Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones . *TRABAJO DE FIN DE MÁSTER MÓDULO DE QUÍMICA INORGÁNICA E INGENIERÍA QUÍMICA*.
50. Liera R., F. J. (2017). Clasificación de los polímeros. *Seminario de actualización profesional en ciencia y tecnología para la industria de los polímeros*.
51. Liera R., F. J. (2017). Los polímeros y su historia. *Aspectos Generales de los Polímeros*.

52. Liera, F. (2017). POLIMERIZACIÓN POR CONDENSACIÓN O POR ETAPAS. *SEMINARIO DE ACTUALIZACIÓN PROFESIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA LA INDUSTRIA DE LOS POLÍMEROS*. IPN.
53. Liñán, S. G. (2018). Polímeros y plásticos II. *El Financiero*.
54. López Díaz, M. A., Ríos Corripio, N., Ramirez Corona, A., & López Malo, E. (2018). EFFECT OF SHORT WAVE ULTRAVIOLET RADIATION ON SELECTED PROPERTIES OF EDIBLE FILMS FORMULATED WITH POMEGRANATE JUICE AND CHITOSAN. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 17(1), 63-73.
55. López, D., & Rojas, A. (2018). Factores que influyen las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de materiales compuestos por madera-plástico. *Entre Ciencia Ingeniería*, 93-102.
56. Luna, J. (2018). Polímeros en medicina: aplicaciones actuales y tendencias futuras. *Plástico. Canales sectoriales*.
57. Mariano. (11 de 07 de 2011). *Tecnología de los Plásticos*. Obtenido de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos.html>
58. Martins S., B. M. (2018). Use of manufacture residue of fluidized-bed catalyst-cracking catalyzers as flame retardant in recycled high density polyethylene. *Journal of Materials Research and Technology*, 9.
59. Mexpolimeros. (2014). *Plastificantes*. Obtenido de <https://www.mexpolimeros.com/plastificante.html>
60. Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments*. Arizona: John Wiley & Sons, Inc.
61. Morales Segura, D. A. (2018). *Análisis de riesgos y oportunidades para potencializar la producción de biopolímeros basados en residuos orgánicos relacionados con la producción de papa en Colombia*. Bogotá.
62. Navia-Porras, D. P., & Bejarano-Arana, N. (2014). EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE BIOPLÁSTICOS TERMO-COMPRIMIDOS ELABORADOS CON HARINA DE YUCA. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12(2), 40-48.
63. Neira-Carrillo, A. (2015). El mundo de los polímeros y biomateriales poliméricos y su aplicación médica. *Tecnovet*, 10-14.
64. Ojogbo, E., Ogunsona, E. O., & Mekonnen, T. H. (2020). Chemical and physical modifications of starch for renewable polymeric materials. *Materials today sustainability*, 7, 100028.

65. Orrego, C. E., Rodríguez, Y. A., Brito, B., & Rodríguez, L. J. (2020). PRODUCTIVIDAD Y COMPETITIVIDAD FRUTÍCULA ANDINA. *FONTAGRO*, 1-41.
66. Palomino Espinosa, S., Lopez Velázquez, A., Marín Hernández, J. J., Hernández Quiroz, T., García González, L., & Hernández Torres, J. (2014). Los materiales compuestos. *LA CIENCIA Y EL HOMBRE REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DE LA UNIVERSIDAD VERACRUZANA*, XXVII(1).
67. Peña Alvarez, C. M. (2010). Determinación de Cenizas Totales o Residuo Mineral. *Food Tech*.
68. Pérez, I. (2019). Situación actual del aguacate. *Ciencia UNAM-DGDC*.
69. Petrocuyo.com. (2020). *El Polipropileno*. Obtenido de <http://www.petrocuyo.com/es/tecnologia/el-polipropileno/naturaleza>
70. Pluas, R. J., Martínez, C. A., Zambrano, Y. E. (2020). Bioplastics: an ecological alternative. *Polo del Conocimiento*, 274-282.
71. Polyexcel, e. (2020). Descubra qué son los polímeros y sus principales tipos. España. Obtenido de <https://polyexcel.com.br/es/esp-industria/descubra-que-son-los-polimeros-y-sus-principales-tipos/>
72. Posada Bustamante, B. (2012). La degradación de los plásticos. *Rev. Univ. EAFIT*, 30(94), 67-86.
73. QuimiNet. (23 de 04 de 2012). *La versatilidad de la glicerina*. Obtenido de QuimiNet: [https://www.quiminet.com/articulos/la-versatilidad-de-la-glicerina-2721819.htm?mkt\\_source=22&mkt\\_medium=11765583864&mkt\\_term=66&mkt\\_content=&mkt\\_campaign=1](https://www.quiminet.com/articulos/la-versatilidad-de-la-glicerina-2721819.htm?mkt_source=22&mkt_medium=11765583864&mkt_term=66&mkt_content=&mkt_campaign=1)
74. QuimiTube. (9 de 05 de 20.14). *Práctica de laboratorio: ¿Cómo se detecta el almidón en una muestra de alimento?* Obtenido de QuimiTube.com: <https://www.quimitube.com/como-se-detecta-almidon-muestra-de-alimento/>
75. Rainieri, S., & Barranco, A. (2019). Rainieri, S., & Barranco, A. (2019). Microplastics, a food safety issue? *Trends in food science & technology*, 84, 55-57.
76. Ruiloba I., L. M. (2018). Bioplastic production from mango seed starch. *REVISTA VERITAS ET SCIENTIA - UPT*, 28-32.
77. Sacithraa, R., MadhanMohan, M., & Vijayachitra, S. (2013). Quantitative Analysis of Tapioca Starch using FT-IR Spectroscopy and Partial Least Squares. *International Journal of Computer Applications*, 1, 29-33.

78. Sagredo, C. (2017). *Polímeros compuestos basados en nanoestructuras de carbono para desarrollar materiales con memoria de forma*, Tesis de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Santiago de Chile.
79. Salas Tornés, J., & Hernández Sánchez, L. Y. (2015). Mezcal cupreata, fuente de admiración. *Revista Ciencia, Usos de plantas mexicanas*, 40-47.
80. Sánchez Banda, L. R. (2019). *Propiedades químicas, morfológicas y funcionales de almidón de semilla de palta (Persea americana Mill.) CV fuerte*. UNT Facultad de Ciencias Agropecuarias Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial. Trujillo - Perú: UNT.
81. Sarria-Villa, R. A., & Gallo-Corredor, J. A. (2016). La gran problemática ambiental de los residuos plásticos: Microplásticos. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 8(1), 21-27.
82. Schwarz, Z. &. (2020). ¿CUÁL ES EL PAPEL DE LOS POLÍMEROS EN COSMÉTICA? DESCUBRE LOS TIPOS DE POLÍMEROS MÁS INNOVADORES. *Tendencias del sector químico*.
83. Sernaqué Auccahuasi, F. A., Huamán Mogollón, L., Pecho Chipa, H., & Chacón Chacón, M. E. (2020). Biodegradabilidad de los bioplásticos elaborados a partir de cáscaras de Mangifera indica y Musa paradisiaca. *Centro Agrícola*, 47(4), 22-31.
84. SIAP, S. (2020). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. México.
85. Silva, M. L., & Martínez, B. G. (2009). Biopolímeros empleados en la fabricación de envases para alimentos. *Publicaciones e Investigación*, 3, 103-129.
86. Standard Methods (1989) Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. New York: American Public Health Association. (s.f.).
87. Tarique, J., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (Maranta arundinacea) starch biopolymers. *Scientific reports*, 11(1), 1-17.
88. Taverna, M. E. (2018). Divulgación científica: Los polímeros en nuestras vidas, ¿qué hacemos con ellos? *Universidad Tecnológica Nacional UTN*.
89. Torres-Ramírez, Y., Rendón-Villalobos, J. R., García-Hernández, E., Solorza-Feria, J., & Flores-Huicochea, E. (2013). Propiedades térmicas y estructurales del acetato de almidón de jícama (Pachyrhizus erosus L.). *Memorias del XXXIV Encuentro Nacional y III Congreso Internacional de la AMIDIQ*, 1247-1252.

90. Torres-Rivero, L. A., Ben-Youssef, B. C., & Pérez-Gasca, M. F. (2019). Características de la glicerina obtenida del proceso de la reacción del metóxido de sodio en la producción del Biodiesel. *Revista de Energía Química y Física*, 6(18), 18-28.
91. Uc León, N. C. (2017). *Caracterización de los productos obtenidos del proceso de pirólisis de residuos lignocelulósicos de agave y su uso como fuente de energía*. Yucatán : CICY.
92. Universidad Politecnica de Valencia. (2020). Materiales Poliméricos y Compuestos. *Curso de fundamentos de ciencias de materiales*. Obtenido de [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15\\_1.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_1.html)
93. YuBrain. (21 de 06 de 2021). *¿Qué es un polímero?* Obtenido de YuBrain: <https://www.yubrain.com/ciencia/quimica/definicion-de-homopolimero/>
94. Zhang, Y., Kang, S., Allen, S., Allen, D., & Gao, T. (2020). Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. *Earth-Science Reviews*, 203, 103118.