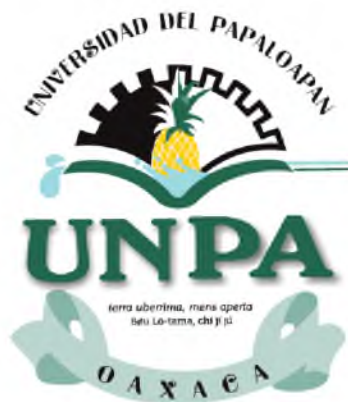




UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

**“OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE
PELLETS DE MATERIAL COMPUESTO OBTENIDO
MEDIANTE PROCESO DE EXTRUSIÓN”**

**TESIS PROFESIONAL PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
DISEÑO**

PRESENTA:

ACELA CRISPINA RUIZ PÉREZ

CON LA DIRECCIÓN DE:

M.C. REY FERNANDO GARCÍA MÉNDEZ

LOMA BONITA, OAXACA, 2023.



Universidad del Papaloapan

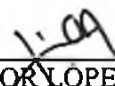
FECHA:	20 de Diciembre del 2022
AREA:	Vice-Rectoría Académica
OFICIO NUMERO:	UNPA/VRA/239/2022
ASUNTO:	Autorización de Impresión de tesis.

**C. ACELA CRISPINA RUIZ PÉREZ
P R E S E N T E:**

En base al artículo 120 del reglamento de alumnos, por medio de la presente se aprueba la impresión de la tesis titulada **“Obtención y caracterización térmica de pellets de material compuesto obtenido mediante proceso de extrusión.”** así como la programación del examen profesional bajo la dirección del M.C. Rey Fernando García Méndez.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente.
terra ubérriima, mens aperta
Bou Lo-tama, chi jí jú


MC. HECTOR LÓPEZ ARJONA
Vice-Rector Académico.



C.c.p. Dra. Laura Patricia Rivas Vázquez. Jefe de Carrera de la Ingeniería en Diseño
C.c.p. L.P. Yesenia Barrientos Arenal. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
C.c.p. M.C. Rey Fernando García Méndez Director de tesis.
C.c.p. Archivo.

OAXACA



Universidad del Papaloapan

Campus Loma Bonita

Jefatura de la Carrera de Ingeniería en Diseño

Loma Bonita, Oaxaca a 16 de diciembre de 2022

Clave: ID/09SE/2022

Asunto: Asignación de Sinodales para
Examen de Titulación

Lic. Yesenia Barrientos Arenal
Jefa de Departamento de Servicios Escolares
Campus Loma Bonita
Presente

Por medio de la presente le informo la asignación de sinodales para el examen de titulación de **Acela Crispina Ruiz Pérez** egresada de la carrera de ingeniería en diseño que **presenta** su tema de tesis titulado: **"Obtención y caracterización térmica de pellets de material compuesto obtenido mediante proceso de extrusión"**.

Sinodales

Dra. Laura Patricia Rivas Vázquez (presidente), M.C. Rey Fernando García Méndez (vocal) y M.C. Samira Belén Mayoral Lagunes (secretario)

Suplentes:

Dr. Roberto Suárez Orduña (primer suplente), M.M. Edmundo Mendieta Fernández (segundo suplente).

Sin otro particular me despido quedando a sus órdenes para cualquier aclaración.

*Terra uberrima, mens aperta
Bou Lo-tama, chí jí jú
Atentamente*

Laura Patricia Rivas Vázquez
Dra. Laura Patricia Rivas Vázquez
Jefa de la Carrera de Ingeniería en Diseño

Vo.Bo.

Héctor López Arjona
M.C. Héctor López Arjona
Vice-rector académico



c.c.p. M.C. Héctor López Arjona, Vice-rector académico
c.c.p. Archivo

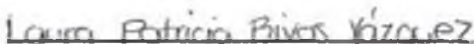


UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN INGENIERÍA EN DISEÑO

LA PRESENTE TESIS TITULADA "OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE PELLETS DE MATERIAL COMPUESTO OBTENIDO MEDIANTE PROCESO DE EXTRUSIÓN ", PRESENTADA POR LA PASANTE ACELA CRISPINA RUIZ PÉREZ, BAJO LA DIRECCIÓN DEL M.C. REY FERNANDO GARCÍA MÉNDEZ HA SIDO REVISADA Y ACEPTADA POR EL JURADO EXAMINADOR PARA SER DEFENDIDA EN EL EXAMEN PROFESIONAL Y OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN DISEÑO.

JURADO EXAMINADOR


M.C. REY FERNANDO GARCÍA MÉNDEZ
DIRECTOR


DRA. LAURA P. RIVAS VÁZQUEZ
REVISOR


M.C. SAMIRA B. MAYORAL LAGUNES
REVISOR

LOMA BONITA, OAXACA, 2022.

DEDICATORIA

A mi grandiosa madre, por jamás dejar de confiar en mí, por ser mi mayor inspiración y reflejo de persistencia, valentía y amor, por ser quien con su esfuerzo y ejemplo ha formado en mí el deseo de superación, por brindarme con su trabajo la oportunidad y confianza de concluir una meta más, por su amor y comprensión incondicional durante este largo camino.

A mis hermanos Rigoberto, Omar, José y Ramón, a los mayores por dedicar parte de su vida a brindarme el apoyo para lograr mis metas, por depositar su confianza en mí y ser mi ejemplo de trabajo, a todos ellos por animarme siempre a no desistir, por ser mi lugar seguro.

A mi familia por animarme siempre, en especial a mi tía Ave, a mis padrinos, Ernesto y Odilia por mostrarme su apoyo cuando lo necesité.

A las familias: Guzmán Soriano por brindarme su cariño y apoyo en los momentos difíciles y estar presentes con nosotros, a la familia Camarillo Pérez, a ellos mis amigos Orlando y Ana que me brindaron siempre un lugar, techo y su amistad, por acogerme como parte de su familia.

A Pedro, por ser primeramente mi amigo incondicional, por impulsarme siempre a no ceder, por acompañarme en este proceso y animarme con cariño cada vez que lo necesité.

A mis amigos, por abrirme las puertas de sus hogares y brindarme siempre su calidez y apoyo.

Gracias a todos los que no están aquí pero que en algún momento de esta travesía han sido una estrella en mi camino.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Papaloapan campus Loma Bonita (UNPA) por brindarme la oportunidad de culminar mis estudios, al sistema SUNEО por brindarme las herramientas, los conocimientos y experiencias inolvidables durante mi estadía en sus universidades, al cuerpo docente de la UNPA y la UTM por sus enseñanzas y dedicación durante la carrera.

A mi director de tesis, el M.C. Rey Fernando García Méndez por la confianza depositada para el desarrollo de este proyecto, por su orientación y conocimientos transmitidos en cada etapa del proceso para la mejora de este trabajo. Agradezco su paciencia y apoyo para que esta tesis pudiera culminar satisfactoriamente.

Al Dr. Mario Valera Zaragoza profesor investigador de la Universidad del Papaloapan campus Tuxtepec por las facilidades brindadas para el acceso a los laboratorios y equipos de caracterización, por su apoyo durante el proceso de extrusión, así como el desarrollo de las caracterizaciones FTIR, DRX y DSC, por los conocimientos y consejos brindados para la mejora en este proyecto.

A la I.Q. Leticia Ramos Vásquez por el soporte, consejos y conocimientos brindados durante todo el proceso de extrusión de los filamentos y la caracterización del material compuesto.

A los técnicos de los laboratorios de la UNPA campus Loma Bonita: L.Z. Christian Parroquín Rodríguez encargada del laboratorio Químico, la I.D. Iraís Téllez Montalvo técnico del laboratorio multimedia, a la M.C.Q Beatriz Castro Hilario encargada del laboratorio de química aplicada (fisicoquímica) y al centro de investigaciones científicas campus Tuxtepec, por todo su apoyo y disposición durante la fase experimental de este trabajo.

A la jefatura de carrera de Ingeniería en diseño, por todo el apoyo para emitir los permisos que facilitaron mi acceso a los laboratorios y equipos necesarios.

A mis revisores, Dra. Laura Patricia Rivas Vásquez y M.C. Samira B. Mayoral Lagunes, por las recomendaciones y conocimientos brindados durante la revisión de este proyecto.

RESUMEN

En el presente trabajo se obtuvieron y caracterizaron térmicamente pellets de un material compuesto de polipropileno (PP) reforzado con partículas de fibras de *agave Angustifolia* Haw mediante proceso de extrusión. La metodología se dividió en tres etapas. La primera fue la obtención y caracterización física de las partículas de fibra. Las fibras fueron sometidas a un tratamiento químico con hidróxido de sodio (NaOH) al 5% y sellados con ácido acético (CH₃COOH). Posteriormente, a través de un proceso de molienda, se obtuvieron fibras de tamaño en un rango de 300µm a 75µm para ser secadas en un horno de convección y eliminar la humedad. Consecutivamente, se caracterizaron mediante las técnicas de difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). La segunda etapa consistió en la elaboración de los materiales compuestos. Se prepararon mezclas de material compuesto con concentraciones al 1.5, 3 y 5% de fibra tratada (F.T) y fibra no tratada (F.N.T), así como una muestra de material testigo (material puro de PP). Al mismo tiempo, se realizaron pruebas piloto con la variación de parámetros de temperatura, velocidad y número de ciclos, para la determinación de los parámetros óptimos de extrusión, los cuáles fueron analizados mediante la observación física y análisis FTIR, obteniéndose así los filamentos y posteriormente peletizados. En la tercera etapa, se realizó la caracterización térmica de los pellets mediante las técnicas de FTIR y calorimetría diferencial de barrido (DSC) para conocer las características térmicas del material compuesto. Finalmente, se pudo comprobar que las partículas de fibras mejoran la estabilidad térmica y las propiedades del material compuesto.

Palabras clave: Partículas de fibra, material compuesto, caracterización térmica.

ABSTRACT

In the present work, pellets of a polypropylene (PP) composite material reinforced with agave *Angustifolia* Haw fiber particles were obtained and thermally characterized by extrusion process. The methodology was divided into three stages. The first was the obtaining and physical characterization of the fiber particles. The fibers were subjected to a chemical treatment with 5% sodium hydroxide (NaOH) and sealed with acetic acid (CH₃COOH). Subsequently, through a grinding process, size fibers in a range of 300 µm to 75µm were obtained to be dried in a convection oven and remove moisture. Consecutively, they were characterized by X-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) techniques. The second stage consisted of the elaboration of the composite materials. Mixtures of composite material with concentrations at 1.5, 3 and 5% of treated fibre (F.T) and untreated fibre (F.N.T) were prepared, as well as a sample of core material (pure PP material). At the same time, pilot tests were carried out with the variation of temperature, speed and number of cycles parameters, to determine the optimum extrusion parameters, which were analyzed by physical observation and FTIR analysis, thus obtaining the filaments and subsequently pelletized. In the third stage, the thermal characterization of the pellets was carried out using FTIR and differential scanning calorimetry (DSC) techniques to determine the thermal characteristics of the composite material. Finally, it was found that the fiber particles improve the thermal stability and the properties of the composite material.

Keywords: Fiber particles, composite material, thermal characterization.

CONTENIDO GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

LISTA DE TABLAS..... XII

LISTA DE FIGURAS XIII

LISTA DE ABREVIATURAS..... XVII

CAPÍTULO 1

ASPECTOS PRELIMINARES

1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2.- JUSTIFICACIÓN	3
1.3.- OBJETIVOS	5
1.3.1.- OBJETIVO GENERAL	5
1.3.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.4.- HIPÓTESIS	6
1.5.- ANTECEDENTES.....	7

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1.- MATERIALES COMPUESTOS	13
2.2.- FIBRAS NATURALES	14
2.3.- MATERIALES POLIMÉRICOS	15
2.3.1.- POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS.....	16
2.4.-PROPIEDADES DE LOS MATERIALES POLIMÉRICOS	18
2.4.1.- PROPIEDADES MECÁNICAS	18
2.4.2.- PROPIEDADES TÉRMICAS.....	20
2.4.3.- TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN TÉRMICA.....	22

2.5.- PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSIÓN.....	25
2.5.1.- COMPONENTES PRINCIPALES.	27

CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

METODOLOGÍA DEL MODELO EXPERIMENTAL	30
---	----

ETAPA 1: OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA-TÉRMICA DE PARTÍCULAS DE FIBRA.

3.1.- MATERIAS PRIMAS.....	31
3.2.- OBTENCIÓN DE LAS FIBRAS DE <i>AGAVE ANGUSTIFOLIA</i> HAW.....	32
3.3.- PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS FIBRAS DE AGAVE	34
3.3.1.- MEDICIÓN DE LA LONGITUD.	34
3.4.- PROCESO DE CORTE	35
3.5.- TRATAMIENTO QUÍMICO.	36
3.6.- OBTENCIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE FIBRA.....	42
3.6.1.- PULVERIZACIÓN DE LAS FIBRAS DE <i>AGAVE ANGUSTIFOLIA</i> HAW.....	42
3.6.2.- TAMIZADO DE LAS PARTÍCULAS.	46
3.7.- CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LAS PARTÍCULAS	47
3.7.1.- ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).	47
3.7.2.- ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	48

ETAPA 2: ELABORACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.

3.8.- PREPARACIÓN DE MEZCLAS PARA ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO.....	50
3.9.- OBTENCIÓN DE FILAMENTO	53
3.10.- PELETIZACIÓN.....	57

ETAPA 3: CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL MATERIAL COMPUESTO.

3.11.- ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	59
3.12.- CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)	60

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1.- PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS FIBRAS.	63
4.2.- PULVERIZADO Y TAMIZADO DE LAS PARTÍCULAS	64
4.3.- CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LAS PARTÍCULAS.	65
4.3.1.- DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)	65
4.3.2.- ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	70
4.4.- OBTENCIÓN DEL FILAMENTO.	75
4.5.- PELETIZACIÓN DE LOS FILAMENTOS	82
4.6.- CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LOS PELLETS	83
4.6.1.- ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	83
4.6.2.- CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)	85

CONCLUSIONES.....	90
--------------------------	-----------

RECOMENDACIONES	93
------------------------------	-----------

BIBLIOGRAFÍA	94
---------------------------	-----------

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1.- Especificaciones técnicas del polipropileno tipo comercial 4100 N.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 2.- Distribución de horas del proceso de secado de fibras tratadas químicamente.</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 3.- Registro de proporciones de las mezclas según porcentaje de concentración.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 4.- Registro de longitudes de la muestra de 100 fibras aleatorias.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 5.- Registro de partículas obtenidas del proceso de tamizado.</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 6.- Variación de parámetros en pruebas de extrusión de filamentos de material compuesto.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 7.- Distribución de pesos del rendimiento total de pellets de material compuesto obtenidos.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 8.- Tabla de resultados de propiedades térmicas de los pellets de material compuesto, por calorimetría diferencial de barrido (DSC).....</i>	<i>86</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.- Sistema de polímeros: (a) amorfo, (b) cristalino y (c) semicristalino.</i>	17
<i>Figura 2.- Diagrama esfuerzo-deformación de un plástico.</i>	20
<i>Figura 3.- Efecto de la temperatura en la estructura y comportamiento de materiales termoplásticos.</i>	21
<i>Figura 4.- Curva DSC, representación de transiciones de temperatura.</i>	22
<i>Figura 5.- Esquema de funcionamiento de un difractómetro de rayos X.</i>	23
<i>Figura 6.- Diagrama de funcionamiento de un espectrómetro por transformada de Fourier.</i>	25
<i>Figura 7.- Esquema general de trabajo de una máquina extrusora para procesar polímeros.</i>	26
<i>Figura 8.- Partes de un tornillo de extrusión.</i>	28
<i>Figura 9.- Proceso de raspado de las pencas del agave.</i>	32
<i>Figura 10.- Pesaje de la fibra inicial en una báscula eléctrica de precisión.</i>	33
<i>Figura 11.- Fibras de Agave angustifolia Haw proporcionado por los productores de mezcal "Los músicos del mezcal" de Santiago Matatlán, Oaxaca.</i>	33
<i>Figura 12.- Muestra de 100 fibras colocadas para ser estiradas y medidas una por una.</i>	34
<i>Figura 13.- Medición de las fibras con un flexómetro.</i>	34
<i>Figura 14.- Proceso de corte manual de las fibras con tijeras.</i>	35
<i>Figura 15.- Fibra de Agave angustifolia Haw.</i>	35
<i>Figura 16.- Fibras cortadas almacenadas en bolsas herméticas.</i>	35
<i>Figura 17.- Pesado de las fibras.</i>	36
<i>Figura 18.- Preparación de muestras en vasos de precipitado.</i>	36
<i>Figura 19.- Pesado de hidróxido de sodio para cada muestra.</i>	37
<i>Figura 20.- Homogeneización de la solución de agua destilada - NaOH.</i>	37
<i>Figura 21.- Vaciado de solución.</i>	38
<i>Figura 22.- Removido de fibras sumergidas en solución de NaOH.</i>	38
<i>Figura 23.- Primer escurrimiento de las fibras.</i>	39
<i>Figura 24.- Removido de fibras sumergidas en agua destilada.</i>	39
<i>Figura 25.- Preparación de la solución de ácido acético.</i>	39

<i>Figura 26.- Último escurrimiento de las fibras.</i>	40
<i>Figura 27.- Fibras escurridas listas para el proceso de secado.</i>	40
<i>Figura 28.- Ingreso de muestras de fibras tratadas para su secado en horno de convección marca Fisher Scientific.</i>	41
<i>Figura 29.- Ingreso de muestras de F.T y F.N.T para su secado en horno de convección.</i>	42
<i>Figura 30.- Sistema de cuchillas del molino Thomas Wiley.</i>	43
<i>Figura 31.- Tamices del equipo. Malla de 2mm, 1mm y 0.5mm, de arriba - abajo, respectivamente.</i>	43
<i>Figura 32.- Alimentación con muestra de F.N.T mediante tolva.</i>	44
<i>Figura 33.- Limpieza y extracción de fibra restante.</i>	44
<i>Figura 34.- Partículas obtenidas de la primera etapa de molienda de F.N.T</i>	44
<i>Figura 35.- Partículas obtenidas de F.T en la primera etapa de molienda.</i>	44
<i>Figura 36.- Cambio de malla.</i>	45
<i>Figura 37.- Tamices ordenados de mayor a menor abertura.</i>	46
<i>Figura 38.- Difractómetro de rayos X D8 ADVANCE BRUKER AXS.</i>	47
<i>Figura 39.- Muestra compactada con ayuda de un porta objetos.</i>	48
<i>Figura 40.- Cargador de porta muestra del difractómetro de rayos X.</i>	48
<i>Figura 41.- Espectrómetro FT-IR marca PerkinElmer modelo Spectrum 100 con accesorio de muestreo ATR universal.</i>	49
<i>Figura 42.- Muestra de partículas colocadas en el porta muestra del espectrómetro.</i>	49
<i>Figura 43.- Accesorio alineado sobre la muestra.</i>	50
<i>Figura 44.- Lavado y secado de frascos de almacenamiento de mezclas.</i>	51
<i>Figura 45.- Frasco tarado listo para agregar muestra de polipropileno (PP).</i>	52
<i>Figura 46.- Pesado de partículas de fibra.</i>	52
<i>Figura 47.- Vaciado de partículas para realizar el mezclado.</i>	52
<i>Figura 48.- Mezclas de polipropileno - partículas de fibra en diferentes concentraciones.</i>	53
<i>Figura 49.- Extrusora marca BEUTELSPACHER MODELO E1930, con su sistema de enfriamiento.</i>	54
<i>Figura 50.- Husillo implementado para extrusión de materiales compuestos UNPA (campus Tuxtepec).</i>	54
<i>Figura 51.- Condiciones utilizadas para la extrusión del filamento final.</i>	55

<i>Figura 52.- Vaciado de mezcla PP + Partículas de fibra, para primer ciclo de extrusión.</i>	56
<i>Figura 53.- Filamento extruído en sistema de enfriamiento.</i>	56
<i>Figura 54.- Alimentación con pellets de material compuesto para segundo ciclo de extrusión.</i>	56
<i>Figura 55.- Filamentos finales con segundo ciclo de extrusión, listos para proceso de peletizado.</i>	56
<i>Figura 56.- Secado de muestras de mezcla PP + Partículas de fibra.</i>	57
<i>Figura 57.- Filamentos de material compuesto en proceso de peletización.</i>	58
<i>Figura 58.- Almacenamiento de pellets durante proceso de peletización.</i>	58
<i>Figura 59.- Pellets finales obtenidos de las tres concentraciones de partículas de fibra reportadas.</i>	59
<i>Figura 60.- Pellets acomodados en porta muestras para mejor lectura en la corrida del análisis.</i>	60
<i>Figura 61.- Calorímetro diferencial de barrido TA-modelo 250.</i>	61
<i>Figura 62.- Gráfica comparativa de los porcentajes de tamaño de partículas por las cuáles está conformado el material compuesto.</i>	65
<i>Figura 63.- Patrón de difracción de rayos x de partículas de fibra de Agave angustifolia Haw no tratadas (F.N.T) obtenidas por proceso manual de enriado.</i>	66
<i>Figura 64.- Patrón de difracción de rayos x de la muestra de partículas de fibra de Agave angustifolia Haw tratadas (F.T), obtenidas mediante proceso manual de enriado.</i>	67
<i>Figura 65.- Comparación de patrones de difracción de rayos x de las partículas de fibra de Agave angustifolia Haw extraídas mediante proceso manual de enriado, no tratadas y tratadas químicamente.</i>	68
<i>Figura 66.- Comparación de patrones de difracción de rayos x de partículas de fibras tratadas y no tratadas, obtenidas mediante proceso manual de enriado (F.T.PME y F.N.T.PME) y proceso mecánico (F.T.PM y F.N.T.PM) respectivamente.</i>	69
<i>Figura 67.- Espectros FTIR de partículas de fibras de agave, tratadas y no tratadas, obtenidas mediante proceso manual de enriado (F.T.PME y F.N.T.PME) respectivamente.</i>	72
<i>Figura 68.- Comparación de espectros FTIR superpuestos de partículas de fibra de agave no tratadas y tratadas químicamente, obtenidas mediante proceso manual de enriado y proceso mecánico, (F.N.T.PME, F.T.PME y F.N.T.PM, F.T.PM) respectivamente.</i>	73

<i>Figura 69.- Espectros FTIR de partículas de fibras de agave, tratadas y no tratadas, obtenidos mediante proceso mecánico y proceso manual de enriado (F.T.PM, F.N.T.PM y F.T.PME, F.N.T.PME) respectivamente.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 70.- Comparativa de espectros FTIR superpuestos del material compuesto en las pruebas de extrusión con la mezcla al 3% de concentración de partículas de fibra tratada, para la elección de parámetros finales a implementar.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 71.- Comparativa de espectros FTIR con mayor claridad, de la muestra sometida al proceso de extrusión con una concentración del 3% de partículas de fibra tratada, como prueba para la elección de parámetros.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 72.- a-b- Filamentos de material compuesto con matriz de PP reforzado con partículas de fibra de Agave angustifolia Haw no tratadas (F.N.T) y tratadas químicamente (F.T).</i>	<i>81</i>
<i>Figura 73.- Pellets de material compuesto de las siete concentraciones sometidas al proceso de extrusión y peletización.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 74.- Comparativa de espectros de pellets de material compuesto reforzado con partículas de fibra no tratada, en concentraciones de 1.5,3 y 5%.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 75.- Comparativa de espectros de pellets de material compuesto reforzados con partículas de fibra tratada en concentraciones de 1.5, 3 y 5%.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 76.- Termograma DSC de pellets de material compuesto reforzados con partículas de fibra de Agave angustifolia Haw, tratadas y no tratadas - zona de fusión.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 77.- Termograma DSC de pellets de material compuesto reforzado con partículas de fibras de Agave angustifolia Haw tratadas y no tratadas - zona de cristalización.</i>	<i>88</i>

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>F.N.T</i> -----	<i>Fibra no tratada</i>
<i>F.T</i> -----	<i>Fibra tratada</i>
<i>PP</i> -----	<i>Polipropileno</i>
<i>DRX</i> -----	<i>Difracción de rayos X</i>
<i>FTIR</i> -----	<i>Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier</i>
<i>DSC</i> -----	<i>Calorimetría diferencias de barrido</i>
<i>TGA</i> -----	<i>Análisis termogravimétrico</i>
<i>NaOH</i> -----	<i>Hidróxido de sodio</i>
<i>F.N.T.PME</i> -----	<i>Fibra no tratada obtenida mediante proceso manual de enriado</i>
<i>F.T.PME</i> -----	<i>Fibra tratada obtenida mediante proceso manual de enriado</i>
<i>F.N.T.PM</i> -----	<i>Fibra no tratada obtenida mediante proceso mecánico</i>
<i>F.T.PM</i> -----	<i>Fibra tratada obtenida mediante proceso mecánico</i>
<i>M1:F.N.T-1.5</i> -----	<i>Muestra 1 de fibra no tratada con concentración al 1.5%</i>
<i>M2:F.N.T-3</i> -----	<i>Muestra 2 de fibra no tratada con concentración al 3%</i>
<i>M3:F.N.T-5</i> -----	<i>Muestra 3 de fibra no tratada con concentración al 5%</i>
<i>M4:PP-100</i> -----	<i>Muestra 4 de polipropileno al 100%</i>
<i>M5:F.T-1.5</i> -----	<i>Muestra 5 de fibra tratada con concentración al 1.5%</i>
<i>M6:F.T-1.5</i> -----	<i>Muestra 6 de fibra tratada con concentración al 1.5%</i>
<i>M7:F.T-1.5</i> -----	<i>Muestra 7 de fibra tratada con concentración al 1.5%</i>
<i>P1FT3</i> -----	<i>Prueba 1 de fibra tratada con concentración al 3%</i>
<i>P2FT3</i> -----	<i>Prueba 2 de fibra tratada con concentración al 3%</i>
<i>P3FT3</i> -----	<i>Prueba 3 de fibra tratada con concentración al 3%</i>
<i>P4FT3</i> -----	<i>Prueba 4 de fibra tratada con concentración al 3%</i>

CAPÍTULO 1

ASPECTOS PRELIMINARES

1.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estado de Oaxaca es considerado uno de los lugares con mayor producción de mezcal dentro del país, actualmente en sus comunidades se emplean principalmente dos especies de agaves para la obtención de esta bebida, dentro de las cuáles se encuentran el *Agave angustifolia* Haw y *Agave potatorum* Zucc (Berumen Barbosa, 2009). Siendo la primera la más empleada debido a su proceso de siembra y cultivo de manera extensiva (Eguiarte & González, 2007). Durante el proceso de obtención de esta bebida, únicamente se emplea el tallo o piña por lo que el productor sólo aprovecha el equivalente al 45% en peso del agave y las hojas que en su conjunto representan el 55% restante, son desechadas y abandonadas en el campo a cielo abierto, contaminando el ambiente debido a la forma inapropiada a que son expuestas para su degradación (Cortés & García, 2016).

En la actualidad las fibras obtenidas del desecho agroindustrial de la producción del mezcal no son aprovechadas para su uso industrial debido a la falta de conocimiento de sus propiedades físicas, químicas, térmicas y mecánicas que ayudan a conocer los requerimientos que estas puedan cubrir en las diferentes áreas de la industria, esto en comparación con otras fibras como el sisal, yute, kenaf, abaca, lechuguilla y coco (Kestur G. et al., 2009),(Bujjibabu et al., 2017).

Sin embargo, debido al creciente interés en la búsqueda de materiales alternativos reforzados con atributos similares a los ya existentes, se estudian las propiedades de fibras naturales como refuerzo de materiales compuestos de matriz polimérica, buscando la reducción del uso de las fibras sintéticas convencionales y con ello disminuir el impacto ecológico debido al alto consumo energético para la producción de estos, las condiciones de abrasión y dificultad de reciclaje de las mismas, en comparación con las fibras naturales las cuáles requieren de pocos niveles de energía para su procesamiento, son una materia prima renovable lo cual facilita su disponibilidad, por lo que con su implementación no sólo se logra evitar el uso de materiales sintéticos, si no reducir el impacto generado por la fibra como residuo.

Por ello con esta investigación se pretende generar información que permita al material compuesto reforzado con partículas de estas fibras ser implementado en procesos industriales aplicables al moldeo por extrusión e inyección, permitiendo así el aprovechamiento de estos desechos y contribuyendo al beneficio de los pequeños productores.

1.2.- JUSTIFICACIÓN

La importancia del uso de los materiales poliméricos a nivel mundial ha llevado a realizar diversas investigaciones acerca de la combinación de estos materiales de origen sintético con materiales orgánicos con el fin de contribuir en las actividades económicas que generan estos tipos de productos. Actualmente, se observa interés hacia el aprovechamiento de los recursos naturales con amplia disponibilidad, características homogéneas y bajo costo con el objetivo de beneficiar tanto en el campo técnico, económico y ambiental a las diversas regiones del país, por lo que se han dirigido investigaciones principalmente a los subproductos agrícolas.

En este caso, es importante buscar alternativas de usos de las fibras del agave mezcalero (*Angustifolia* Haw) con un mejor impacto en el ambiente, cuya producción es de las actividades más importantes en las distintas regiones del estado de Oaxaca (García-Méndez et al., 2020), específicamente en la región de los valles centrales, esto debido a que se cuenta con una producción cada vez mayor de esta planta, en consecuencia, a la demanda aumentada de los productos mezcaleros en los últimos años, incrementando la producción nacional en un 40%, equivalente a 8,099,591 litros de mezcal, de los cuáles en el estado se producen entre el 85% - 90% de la cantidad total, a su vez, el 88.11 % se obtiene a partir de la variedad del *Agave angustifolia*, según el informe estadístico del Consejo Regulador del Mezcal (CRM, 2020) y el consejo Mexicano Regulador de la Calidad de Mezcal A.C. (COMERCAM, 2022), teniendo así una mayor cantidad de residuos.

Sin embargo, hoy en día en la industria podemos encontrar con mayor facilidad estos materiales combinados conocidos como materiales compuestos, con refuerzos sintéticos como las fibras de carbono y/o fibras de vidrio, debido a esto, las empresas fabricantes de materiales compuestos se han direccionado en la búsqueda de materiales alternativos que ofrezcan prestaciones similares a las ya existentes, en ese sentido las fibras naturales son un sector en claro desarrollo, incluso con ciertas ventajas en ciertos campos de aplicación como en el aislamiento acústico (en construcción) ya que presenta mejores propiedades acústicas, disminuye la vibración, contribuye a la seguridad pasiva, pueden

ser triturados, reutilizados y quemados produciendo menor contenido de cenizas (Valea et al., 2005). Al mismo tiempo, las fibras de celulosa ofrecen un módulo y resistencia específica elevada, una relación longitud / diámetro adecuado, baja densidad, mínima abrasión sobre los equipos de procesamiento, ausencia de riesgos para la salud durante su manipulación, biodegradabilidad y bajo coste.

Es por ello que con este trabajo se pretende generar información acerca del uso de las partículas de las fibras de *Agave angustifolia* Haw al ser incorporado a un polímero para formar un material compuesto con propiedades mecánicas y térmicas que permitan su implementación en procesos de conformado como el proceso de extrusión e inyección, aprovechando las ventajas en el campo técnico, pero también en el ámbito económico ya que estas fibras son un sub producto de la elaboración de mezcal en el estado (Cortés & García, 2016), (García et al., 2020), (Hidalgo et al., 2015), (Silva et al., 2009), por lo que sus costos son bajos y resulta de esta manera, un recurso explotable del cual se puede obtener una retribución económica para los productores oaxaqueños.

1.3.- OBJETIVOS

1.3.1.- OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades físicas y térmicas del material compuesto (polipropileno/partículas) obtenidas por un proceso de extrusión, para determinar el comportamiento del material mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) y espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

1.3.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modificar las fibras superficialmente a través de un proceso alcalino con hidróxido de sodio (NaOH) y recubrirlas con ácido acético (CH₃COOH).
- Obtener y controlar el tamaño de las partículas de celulosa a través de un proceso mecánico de pulverizado y posteriormente tamizado.
- Determinar las propiedades químicas de las partículas tratadas y no tratadas mediante la técnica de difracción de rayos x (DRX) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) con la finalidad de conocer la rigidez del material de refuerzo y el efecto del tratamiento alcalino.
- Obtener filamentos de material compuesto mediante el proceso de extrusión con una matriz de polipropileno reforzada con partículas de agave de la variedad *Angustifolia* Haw tratadas y no tratadas, variando las concentraciones en el compuesto respecto al peso en 1.5%, 3% y 5%.
- Obtener pellets del material compuesto a través del proceso de peletizado de los filamentos y determinar las propiedades físicas y térmicas a través de análisis DSC y FTIR.

1.4.- HIPÓTESIS

Al agregar partículas de fibras de *Agave angustifolia* Haw tratadas superficialmente, como refuerzo en diferentes concentraciones en la elaboración de materiales compuestos con matriz de polipropileno obtenidos mediante proceso de extrusión, las partículas de fibras contribuirán en mejorar la estabilidad térmica y las propiedades del material compuesto.

1.5.- ANTECEDENTES

En la actualidad la búsqueda y el desarrollo de nuevos materiales es cada vez mayor y se ha centrado en propuestas que cumplan con requisitos estructurales y de diseño con una conciencia ambiental, que permitan reducir el impacto gracias a las ventajas en sus propiedades, las cuáles se buscan mejorar a partir de la fusión de dos o más elementos con propiedades físicas y químicas diferentes, con el objetivo de obtener un nuevo material con propiedades y características mejoradas que las que poseen los constituyentes actuando por separado, conformado por una fase continua y de mayor presencia llamada matriz y una fase discontinua denominada refuerzo, presente en menor proporción, los cuáles conforman a un material compuesto.

Para constituir estos materiales es necesario el estudio de las propiedades de sus elementos, tanto del polímero a utilizar como matriz, de las cuáles hoy en día estas propiedades se conocen gracias a la aportación de los fabricantes, así como de la implementación de las fibras naturales.

Para ello se han realizado diversas investigaciones que han permitido la disponibilidad de datos mejorados sobre las propiedades de materiales compuestos con fibras naturales entre las que destacan el yute, caña de azúcar, lechuguilla y coco, cuyas caracterizaciones permiten abrir las áreas de desarrollo de estos materiales para evaluar la efectividad de su procesamiento, el impacto de entornos diferentes en sus propiedades y para encontrar áreas de aplicación adecuadas para cada una de ellas, tal es el caso del yute que menciona Kestur G. et al.(2009) obteniendo parámetros que han permitido la implementación de esta fibra en un material compuesto para la industria textil, en el cuál obtuvieron que la tela de yute puede estirarse hasta aproximadamente el doble de su longitud original como compuesto, una característica útil en el diseño de prendas en esta área.

En este caso las fibras de agave han sido estudiadas en “Caracterización de propiedades mecánicas de fibras de *Agave angustifolia* Haw” (Caballero et al., 2008), en donde se determina la resistencia última a la tracción, porcentaje de deformación y módulo de elasticidad de las fibras de las hojas del agave según su ubicación, lo que permite conocer

en forma detallada las características de estas fibras y sus variaciones mecánicas comparadas con otras fibras, de dónde se encuentra mayor relación con fibras de sisal y henequén; por lo que se concluye que su principal aplicación puede ser como material de refuerzo así como aplicación en los geotextiles para la recuperación de suelos erosionados. De la misma manera Cortés & García (2016) en su investigación: morfología de las fibras de bagazo obtenidas del proceso de elaboración del mezcal y efectos sobre sus propiedades de tracción, concluyen que teniendo en cuenta las propiedades mecánicas de tracción en función de los diámetros, longitudes de calibre y tasa de deformación, las fibras de bagazo de esta misma especie de agave utilizadas para la producción del mezcal tienen un gran potencial para su uso como material de refuerzo para la elaboración de biocompuestos.

Por otro lado García et al. (2020) en su estudio: propiedades termoquímicas y mecánicas de tracción de la fibras extraídas mecánicamente de hojas de *Agave angustifolia* Haw, determinaron que la composición química de las hojas de esta especie es de: 61,8% de celulosa, 18,1% hemicelulosa, 11,2% lignina, 7% agua y 1,76% de ceniza, valores comparables a los de otras fibras lignocelulósicas. En cuanto a las propiedades mecánicas de tracción, se obtuvo que la resistencia a la tracción aumentó con una disminución del diámetro en la fibra mientras que el módulo de Young aumentó de 7.28 a 10.10 GPa en relación con el aumento en la longitud del calibre (10 a 20 mm), aunque no representa una diferencia estadística representativa. La temperatura de descomposición de las fibras resultó ser de 260°C a 400°C y se le relaciona con la degradación de sustancias como la hemicelulosa y celulosa, lo que significa que son térmicamente estables hasta esa temperatura, probablemente debido a su mayor cristalinidad y contenido de lignina, por lo que concluyen que las fibras foliares de *Agave angustifolia* Haw pueden utilizarse en aplicaciones técnicas como material de refuerzo en una matriz polimérica que pueda procesarse a temperaturas inferiores a 185°C debido a la degradación de los componentes de holocelulosa, hemicelulosa y celulosa, que comienzan a 190°C, esto de acuerdo a los resultados obtenidos en los análisis termogravimétrico (TGA) y DSC de la fibra de agave.

Sin embargo, la composición de materiales compuestos con fibras lignocelulósicas muchas de las veces resultan fibras dispersas físicamente en una matriz polimérica, lo que provoca una mala adherencia entre la matriz y el refuerzo y por consecuencia las

propiedades mecánicas son malas (Kestur G. et al., 2009) y para obtener un material con propiedades competitivas es necesario que se logre una buena interfase entre el material de refuerzo y la matriz, esto puede lograrse gracias a la modificación de la superficie del refuerzo o bien la implementación de agentes compatibilizantes, aunque si bien, existen máquinas de moldeo por extrusión e inyección comunes en la industria para el procesamiento de estos materiales compuestos con los que se tiene la capacidad de dispersar las fibras de manera uniforme por toda la matriz (Sallih et al., 2014), puede resultar fundamental la aplicación de un tratamiento superficial para ayudar a mejorar la adherencia, aumentar la resistencia y posiblemente una mayor durabilidad del material (Kestur G. et al., 2009).

Por su parte, Mechakra et al. (2015) estudió las propiedades mecánicas de un material compuesto con matriz de polipropileno con fibras cortas de Alfa con un tratamiento químico optimizado que es el tratamiento alcalino con una solución de hidróxido de sodio (NaOH), el más común por razones económicas, aplicados en diferentes duraciones (24 y 48 horas) y a las diferentes composiciones del material que van del 10%, 20% y 30%. En esta investigación se obtuvieron los compuestos por un proceso de extrusión y posteriormente se inyectaron por una prensa de inyección para obtener los especímenes para los ensayos. Una observación mediante un microscopio electrónico de barrido (MEB) permitió determinar el impacto de este tratamiento en el material debido al importante aumento del módulo de Young que varió de un 19,69 % al 132,33% con respecto al polipropileno puro y de la resistencia a la tracción de 11,33% a 30,45% con respecto a las fibras no tratadas para el 30%, por lo tanto, presenta una alta rigidez. Concluyendo así, que la duración del tratamiento químico de 24 horas, dio mejores resultados que la de 48 h y haciendo la comparación en esta misma investigación es importante mencionar que los estudios de otras fibras muestran características mecánicas inferiores a las obtenidas en este estudio.

El uso de fibras naturales tiene ventajas como ser menos abrasivas para las herramientas y no causan grandes problemas en las personas que lo manipulan, además de que son materiales económicos que ya han terminado su ciclo de vida, por lo que su uso se ha extendido a sectores de investigación como la construcción, automotriz, la aviación y el área textil (Kestur G. et al., 2009).

Por otra parte, en México se han realizado trabajos de investigación de grado a cerca de las fibras de agave de diferentes especies, tal es el caso del *Agave Tequilana Weber en* “Análisis de compuestos reforzados con fibra natural de agave en piezas moldeadas por inyección” (Vargas R., 2014). En donde se estudió el compuesto con fibras de 3mm de longitud aproximadamente para generar finalmente piezas a través del moldeo por inyección de este compuesto con una concentración del 5%, enfocándose en la evaluación del efecto del tratamiento superficial alcalino utilizando hidróxido de sodio (NaOH), concluyendo que después del tratamiento los compuestos con fibra de agave presentaron mejoras en las propiedades mecánicas de flexión, así como en la resistencia al impacto, mientras que en las propiedades de tensión se vieron reducidas a consecuencia de la pobre adhesión interfacial de los materiales a consecuencia del tamaño de las partículas del refuerzo. Además de determinar el efecto de las condiciones de control en el proceso de moldeo por inyección sobre las piezas generadas, modificando las variables de presión de inyección, la velocidad de inyección, el colchón y la temperatura de fundido. Concluyendo que la velocidad de inyección mostró no tener efecto sobre la resistencia a la tensión y flexión. En caso de usar refuerzos sin procesos de limpieza, en forma de polvos u otra morfología que dificulte la orientación de las partículas dentro de la cavidad del molde, la presión de inyección deberá ser menor o de 56Kg/cm².

En el estudio de otras fibras, Bujjibabu et al. (2017) evalúa el uso de los residuos fibrosos de plantaciones de banano y coco como refuerzo de polipropileno termoplástico considerando aspectos como la absorción de agua, fabricando las muestras del material compuesto utilizando extrusoras de doble husillo y máquinas de moldeo por inyección con diferentes cargas de fibra. Evaluando las propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión y la resistencia al impacto. Se obtuvo que la resistencia al impacto del compuesto reforzado con plátano y fibras de coco aumenta hasta un 10% en peso de fibra y luego disminuye, en cuanto a la absorción de agua que se realizó a tiempos diferentes de 24h, 48 h y 72 h se observó un ligero aumento en la absorción de humedad con respecto al aumento en el tiempo de remojo.

En cuanto a las fibras de *Agave angustifolia* Haw, Ruiz Jiménez (2016) en: Estudio mecánico de un composite adicionado con fibras de agave, se obtuvo un material compuesto a partir de una matriz de polietileno de alta densidad reforzado con fibras de

esta especie de agave, los materiales fueron elaborados por proceso de extrusión e inyección, de dónde concluyeron que el compuesto, resultó con un aumento en sus propiedades mecánicas al adicionar un 10% en peso de fibras de bagazo de agave, especialmente en el módulo de elasticidad y el porcentaje de elongación. Respecto al tratamiento químico aplicado a las fibras con una solución al 5% de NaOH, concluyen no haber observado cambio significativo en el carácter hidrofílico de las fibras, sin embargo, las fibras tratadas mostraron una mejor adherencia interfacial entre la fibra / matriz. Al mismo tiempo la cristalinidad del polietileno de alta densidad se vio disminuida por la adición de las fibras de refuerzo.

De esta investigación se concluye además que debido a que este material tiende a resistir fuerzas a tensión sufriendo una deformación mínima puede ser implementado en piezas que requieran de una alta estabilidad dimensional, piezas para la construcción y conducción, láminas, cajas, embalajes, mobiliario urbano, muebles en general.

Por su parte De Jesús Angulo (2020), en “Elaboración de un material compuesto para impresión 3D” desarrolló un filamento de material compuesto con una matriz de polipropileno reforzada con fibras de *Agave angustifolia* Haw extraídas mediante un proceso mecánico, las cuales fueron caracterizadas físicamente para después ser tratadas químicamente con una solución de NaOH al 5% para mejorar el carácter hidrofílico de las fibras, se elaboraron filamentos de material en concentraciones del 1.5 %, 3%, y 5% tanto para fibras tratadas y no tratadas mediante proceso de extrusión, los cuales fueron utilizados para la fabricación de probetas impresas en 3D, posteriormente fueron sometidas a pruebas de torsión aparente en donde se observó y concluyó que a mayor concentración de fibra las probetas tienden a ser más rígidas, por lo tanto, las deformaciones son menores. De este trabajo se comprobó además derivado de los análisis realizados a las partículas de fibra TGA, DSC y DRX, que las fibras tratadas presentan mayor pérdida de masa y mayor índice de cristalización debido al tratamiento realizado por lo que resultan ser más rígidas y térmicamente más estables en comparación con las fibras no tratadas, ya que su proceso de degradación inicia por encima de los 251 °C y 220°C respectivamente. Finalmente, los resultados obtenidos pudieron comprobar que los filamentos obtenidos en esta investigación son funcionales para ser utilizados en procesos térmicos de extrusión e inyección, con un uso potencial en la manufactura aditiva

CAPÍTULO 2

**MARCO
TEÓRICO**

2.1.- MATERIALES COMPUESTOS

Un material compuesto es la combinación de un material como matriz y un material de refuerzo con el fin de obtener propiedades y características específicas y mejoradas, en las que la matriz proporciona soporte al refuerzo y actúa como un medio de transferencia de carga entre fibras (Elanchezhian et al., 2018). Actualmente, la mayoría de los materiales compuestos utilizados están basados en matrices poliméricas.

La adición de fibras naturales a una matriz polimérica resulta en un compuesto con características mecánicas particulares, esto debido a diversas modificaciones que se pueden realizar tanto en el refuerzo como en la matriz (Kestur G. et al., 2009). Depende de los porcentajes de concentración y las longitudes de las fibras implementadas, así como de las modificaciones a la superficie de la fibra. El refuerzo determina en gran medida estas propiedades mecánicas debido a su tipo, forma y posicionamiento puesto que un alto contenido de refuerzo fibroso produce una alta resistencia a la tracción (que aumenta con la longitud de la fibra), pero no necesariamente confiere una mayor rigidez (Martin et al., 2013).

En los compuestos poliméricos, la resistencia al impacto, depende de la naturaleza de la fibra, el polímero y la unión entre ambos materiales, en Elanchezhian et al. (2018) se estudiaron las propiedades mecánicas del abacá, yute y sisal, de dónde se obtuvo que aun que las propiedades varían de una fibra a otra, la resistencia de todos los compuestos aumentó con la carga de fibra.

Por otro lado, Sanjuan & Jasso (2009) en el análisis de la fibra de *Agave tequilana Weber* y fibras de henequén como refuerzo en una matriz de polipropileno virgen y de consumo, implementando un agente de acoplamiento para mejorar la interacción refuerzo-matriz, obtuvieron que los compuestos con fibra de henequén presentaron valores ligeramente menores en el módulo de flexión, la resistencia última y deformación a la rotura que los reforzados con fibra de agave, atribuyéndole este hecho al menor contenido de celulosa y lignina en el henequén. Por lo que el efecto reforzante en tracción resultó superior con la fibra de *Agave tequilana Weber*.

2.2.- FIBRAS NATURALES

Las fibras naturales son un material fibroso extraído de la naturaleza solamente con pequeñas manipulaciones mecánicas, constituidos principalmente por celulosa y lignina, además de otros componentes que se encuentran en menor cantidad como la hemicelulosa y ceniza (Bodros & Baley, 2008).

Este material representa una gran ventaja de disposición una vez terminado el ciclo de vida de las plantas, uno de los motivos por los cuáles se han tomado de la naturaleza para ser estudiados e implementados como agentes de refuerzos de materiales compuestos ya que representan bajo costo, además de representar ventajas como la baja densidad, alta rigidez, bajos requerimientos en equipo de proceso, biodegradabilidad, son menos abrasivas para las herramientas y equipo de proceso así como para las personas que lo manipulan durante su procesamiento (Bledzki & Gassan, 1999), (Kestur G. et al., 2009).

Las características físicas y químicas, así como sus propiedades mecánicas y térmicas de las fibras naturales han sido estudiadas con la finalidad de aprovecharlas como agentes de refuerzo. En este sentido, Dittenber & Gangarao (2012) mencionan que el contenido de celulosa, lignina, pectina y hemicelulosa en las fibras vegetales influye en sus propiedades por lo que eliminar la pectina y la lignina se ha vuelto un proceso muy importante para mejorar el efecto reforzante de las fibras naturales.

Sin embargo, las fibras de las plantas de agave se han estudiado poco, algunas como el *Agave azul* (Kestur G. et al., 2013), *Agave Salmiana* (De Dios Naranjo et al., 2016), *Agave Tequilana Weber* (Sanjuan & Jasso, 2009), *Agave Angustifolia* Haw (Caballero et al., 2008), (Hidalgo et al., 2015b), (Cortés & García, 2016), (García et al., 2020).

En un material compuesto la valoración de las fibras naturales es de suma importancia, la evaluación de propiedades como la densidad y la humedad en comparación a la fibra de vidrio, cuya densidad es de 2.6 g/cm^3 , las fibras naturales como el cáñamo tienen una densidad de 1.5 g/cm^3 (Brown et al., 2006) en donde además quedó demostrado como una mejor compactación fibra matriz aumenta ligeramente la absorción en agua debido a la formulación con fibra molida, en comparación con fibras finas y gruesas, lo que a su

vez muestra una parte de la influencia de la longitud de las fibras para lograr una distribución más homogénea. El contenido de humedad por otro lado, establece los procedimientos de extracción, procesamiento y aplicaciones.

Las propiedades de las fibras de bagazo de agave de la variedad *Angustifolia* Haw, han resultado estar dentro del rango reportado para otras fibras vegetales (Cortés & García, 2016). Así como las fibras obtenidas de las hojas de esta misma variedad, mediante un proceso de enriado desarrollado en las etapas de cocción, primera maceración, machacado, segunda maceración, desfibrado y secado para la extracción de las fibras (Caballero et al., 2008) que demuestra que el comportamiento mecánico de las fibras de esta variedad de agave se relaciona con el comportamiento de fibras de otras variedades como el sisal, Henequén, americana, Curaua y yute, comparándose principalmente con las dos primeras, así como los valores de temperatura de degradación y la composición química. Las fibras de bagazo de Agave angustifolia evaluados por Hidalgo et al. (2015) y referenciados por los autores anteriores muestran que la degradación de la fibra comienza a 225°C.

2.3.- MATERIALES POLIMÉRICOS.

Los polímeros son moléculas de gran tamaño, constituidas por “eslabones” orgánicos denominados monómeros, unidos mediante enlaces covalentes (Hermida, 2011). Es decir, los polímeros son compuestos químicos cuyas moléculas están formadas por la unión de otras moléculas más pequeñas llamadas monómeros, generalmente orgánicas, las cuáles se entrelazan entre sí como si fueran los eslabones de una cadena (Torres & Centeno, 2014).

Los materiales poliméricos comprenden materiales que van desde los familiares plásticos al caucho y se trata de compuestos orgánicos basados en el carbono, hidrógeno y otros elementos no metálicos caracterizados por la gran longitud de las estructuras moleculares (Sugawara & Nikaido, 2014). Son materiales que, al ser sometidos a distintos cambios de temperaturas, se vuelven deformables o flexibles.

Los polímeros se pueden clasificar según su origen, considerando la estructura de las macromoléculas o según su uso (Hermida, 2011)

- **Según su origen:** se clasifican en naturales y sintéticos.

Naturales: Son sustancias producidas por organismos vivos que se emplean sin modificación, entre ellos, las proteínas empleadas por las arañas para tejer su tela, polisacáridos y caucho natural.

Sintéticos: Son macromoléculas creados por el hombre y se dividen en dos categorías según su comportamiento al ser calentados: termoplásticos y termorrígidos. Los primeros se ablandan o funden al calentarse y son solubles en disolventes adecuados, los termorrígidos, en cambio, se descomponen al ser calentados y no pueden fundirse ni solubilizarse.

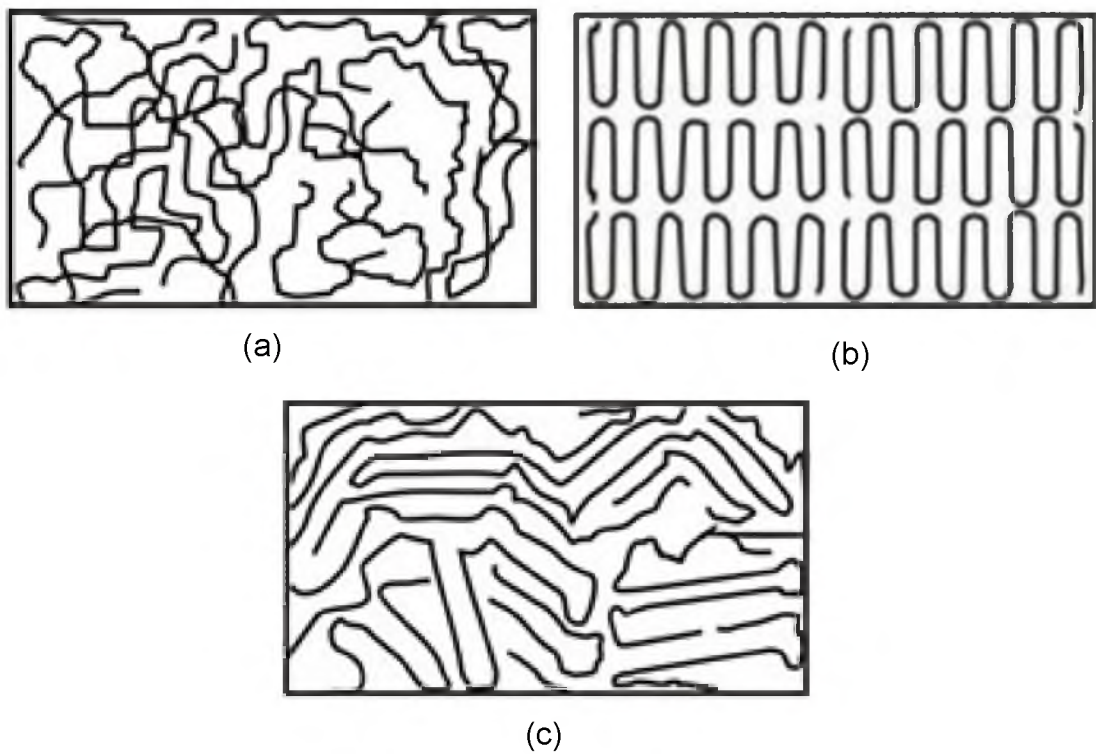
- **Según su estructura:** se clasifican en lineal, ramificado, entrecruzado, homopolímero y copolímero.
- **Según su respuesta termo-mecánica:** se clasifican en termoplásticos, termo rígidos, elastómeros, adhesivos, recubrimientos de superficies y fibras.

2.3.1.- POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Estos materiales por lo general se comportan de manera plástica y dúctil, pueden ser conformados a determinadas temperaturas a la que funden y fluyen por lo que pueden ser moldeados fácilmente en una forma deseada la cuál conservará al enfriarse, pueden ser recalentados o reconformados sin afectar el comportamiento del polímero debido a que la naturaleza de sus enlaces no se modifica radicalmente cuando la temperatura se eleva, por lo tanto, son reciclables. Los polímeros termoplásticos pueden separarse en amorfos, cristalinos y semicristalinos (Figura 1).

- **Amorfos:** El estado amorfo se presenta principalmente en polímeros ramificados, polímeros tácticos y polímeros con cantidades significativas de dos o más constituyentes monoméricos muy diferentes. Son de cadena larga con baja cristalinidad y se hacen elásticos cuando se calientan por arriba de la temperatura de transición vítrea (Torres & Centeno, 2014).

- **Cristalinos:** Los polímeros con capacidad de cristalizar son aquellos cuyas moléculas son química y geométricamente regulares en su estructura (Beltrán & Marcilla, 2012). Un polímero muy regular que se empaca bien en una red cristalina será cristalino y por lo general, más denso, fuerte y rígido que un polímero semejante con menor grado de cristalinidad (Torres & Centeno, 2014).
- **Semicristalinos:** Cuando el material semicristalino se enfría desde su estado líquido, se produce un repentino descenso de su volumen específico (Hermida, 2011).



*Figura 1.- Sistema de polímeros: (a) amorfo, (b) cristalino y (c) semicristalino.
Fuente: (Torres & Centeno, 2014).*

2.4.-PROPIEDADES DE LOS MATERIALES POLIMÉRICOS

2.4.1.- PROPIEDADES MECÁNICAS

El comportamiento mecánico de un material refleja la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material (es decir, su deformación) (Sugawara & Nikaido, 2014).

Las propiedades mecánicas de los polímeros dependen fundamentalmente de su composición, estructura y condiciones de procesado (Beltrán & Marcilla, 2012). Asimismo, existen otros factores que deben considerarse y son, la naturaleza de la carga aplicada, su duración y las condiciones del medio (Sugawara & Nikaido, 2014).

Para caracterizar la respuesta mecánica de un material se puede emplear el ensayo de tracción que consiste en disponer una muestra de sección transversal constante (cilíndrica o prismática, maciza o hueca) en una máquina de ensayos que se encarga de estirar o comprimir la muestra a una velocidad constante (Hermida, 2011). A partir de este ensayo se puede obtener el diagrama de esfuerzo-deformación de un material (Figura 2) mediante el cual es posible determinar algunas propiedades importantes del material, tales como su módulo de elasticidad y si el material es dúctil o frágil (Beer et al., 2012).

Esfuerzo.

La fuerza por unidad de área, o la intensidad de las fuerzas distribuidas a través de una sección dada, se llama *esfuerzo* sobre esa sección y se representa con la letra griega σ (sigma) la cual se obtiene al dividir la magnitud de la carga axial (P), entre el área transversal (A) (Beer et al., 2012) a partir de la siguiente fórmula: $\sigma = P/A$.

Deformación unitaria.

La deformación normal es un elemento, también conocido como deformación unitaria normal, como la deformación de un elemento por unidad de longitud (Beer et al., 2012). La deformación unitaria se representa por ϵ (épsilon), por lo que se tiene que: $\epsilon = \delta/L$, de dónde: δ = Deformación y L= Longitud total.

Diagrama esfuerzo- deformación

Del diagrama esfuerzo-deformación (Figura 2), es posible determinar si las deformaciones en la muestra desaparecerán después de que la carga sea retirada, en cuyo caso se dice que el material se comporta elásticamente, o si resultará en una deformación plástica o deformación permanente (Beer et al., 2012).

La figura 2 muestra una curva típica esfuerzo-deformación obtenido de un ensayo en el que el esfuerzo aplicado varía de forma constante. A pesar de que la respuesta del material puede ser muy diferente dependiendo de la orientación del esfuerzo, la forma general de las curvas es siempre muy parecida (Beltrán & Marcilla, 2012). De donde:

(A) Límite de proporcionalidad: Muestra una proporcionalidad entre esfuerzo y deformación, es decir el material se comporta siguiendo la ley de Hooke.

(B) Límite elástico o punto de fluencia: A partir de este punto la deformación deja de ser elástica por lo que este punto recibe el nombre de límite elástico o punto de fluencia. Los esfuerzos y deformaciones correspondientes a este punto reciben el nombre de esfuerzo límite y deformación límite, respectivamente.

(C) Esfuerzo máximo: A partir de este punto puede ocurrir que se requiera de un esfuerzo mayor para seguir deformando el material. El tramo BC, es aproximadamente horizontal, como consecuencia de que el material se hace dúctil y fluye a poco que varíe el esfuerzo aplicado.

(D) Esfuerzo de rotura: corresponde al momento en que el material rompe, con un esfuerzo de rotura que recibe el nombre de resistencia a la rotura y una deformación que en el caso de ensayos de tracción se denomina, alargamiento a la rotura.

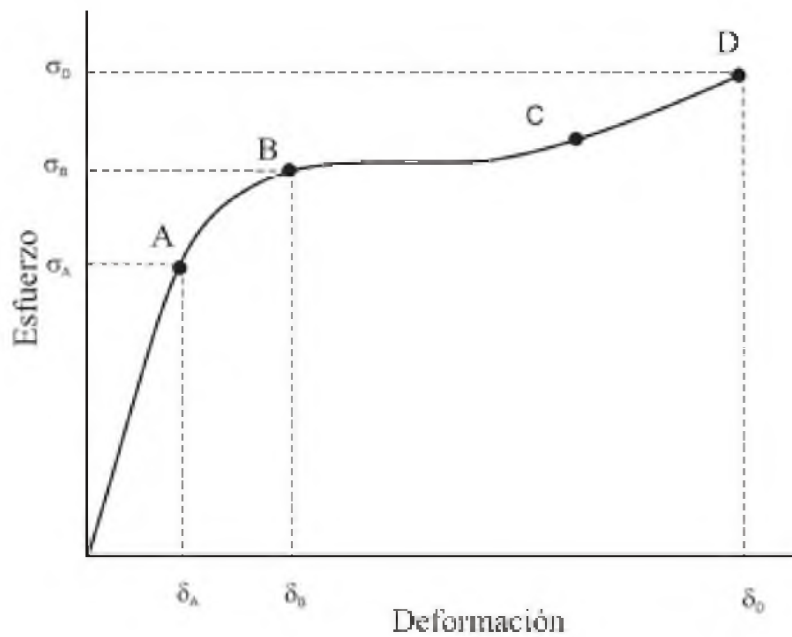


Figura 2.- Diagrama esfuerzo-deformación de un plástico.
Fuente: (Beltrán & Marcilla, 2012)

2.4.2.- PROPIEDADES TÉRMICAS

Las propiedades térmicas de un material indican los cambios que sufre este mismo a medida que absorbe energía en forma de calor, entre las propiedades térmicas con las cuales se puede caracterizar un material se encuentran el punto de fusión, la degradación térmica, la temperatura de transición vítrea y porcentaje de cristalización.

Temperatura de degradación: La degradación de un material se da cuando este se deteriora al ser sometido a muy altas temperaturas, el material se quema o carboniza y a la temperatura a partir de la cual se manifiestan estos cambios en las propiedades físicas del material es la conocida temperatura de degradación, que limita la utilidad del polímero y representa la temperatura superior a la cual un material puede ser conformado de manera útil.

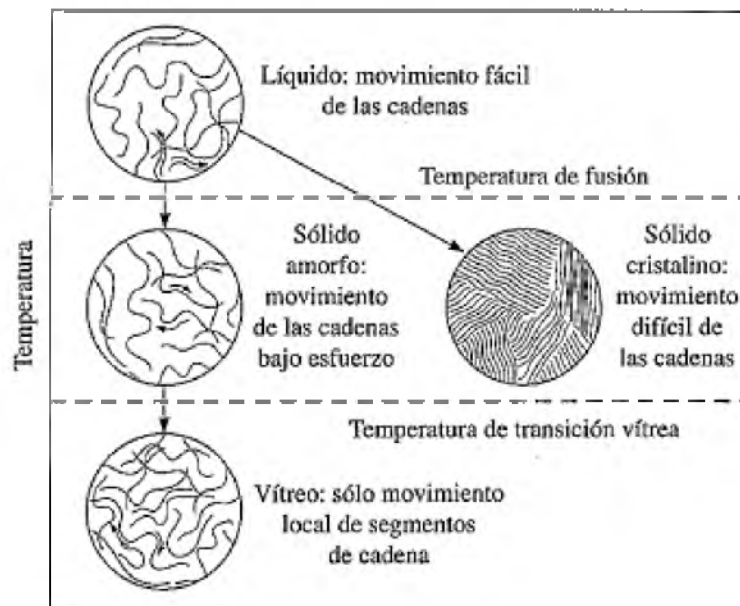
La temperatura de fusión: Es la temperatura por debajo de la cuál las cadenas se organizan para formar regiones cristalinas, por lo que varía en función del grado de

cristalinidad del material. Representa el cambio del estado de material de estado sólido a líquido.

La temperatura de transición vítrea: Define el cambio de comportamiento de material del estado elastomérico a vítreo. Por debajo de la temperatura de transición vítrea, los polímeros se vuelven duros y frágiles ya que la movilidad de sus cadenas es muy restringida por lo que presenta un comportamiento parecido a un vidrio (Askeland et al., 1963).

El grado de cristalinidad: El grado de cristalinidad se ve afectado por las características de la cadena polimérica y de fabricación del material. La cristalinidad produce una pérdida de transparencia del polímero y afecta en las propiedades físicas, mecánicas, térmicas y de degradación de un material.

En la figura 3 se pueden observar algunas temperaturas y estructuras críticas que se presentan en los materiales termoplásticos.



*Figura 3.- Efecto de la temperatura en la estructura y comportamiento de materiales termoplásticos.
Fuente: (Askeland et al., 1963)*

2.4.3.- TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN TÉRMICA

Pueden clasificarse en función del fenómeno físico o químico que se registra en función de la temperatura, en dónde cada técnica evalúa la variación o los cambios en una propiedad en función de un programa térmico.

Calorimetría diferencial de barrido (DSC): En esta técnica se evalúa el calor y la temperatura de las transiciones y de las reacciones en dónde el comportamiento en los diferentes puntos del material polimérico nos permite identificar las transiciones más importantes que son la temperatura de fusión (T_m) y la temperatura de cristalización (T_c). Se utiliza además el estudio de cinéticas de reacción, análisis de purezas, identificación de mezclas y materiales.

Estas transiciones térmicas pueden ser medidas a partir de una curva calorimétrica como se muestra en la figura 4 de dónde podríamos distinguir dichas transiciones como procesos exotérmicos o endotérmicos, en la zona 1 se asocia la información a la transición vítrea del material (T_g), la temperatura de inicio, el punto de inflexión y el punto a la cual termina el cambio de este comportamiento, en la zona 2 es posible identificar el rango de temperatura en el cual se produce el proceso de fusión de la fase cristalina del material mediante un pico, es decir, la temperatura de fusión (T_m) así como el porcentaje de cristalinidad del material, por último, la zona 3 se asocia al proceso de degradación o combustión del material donde se puede observar el inicio de la degradación de éste (T_d).

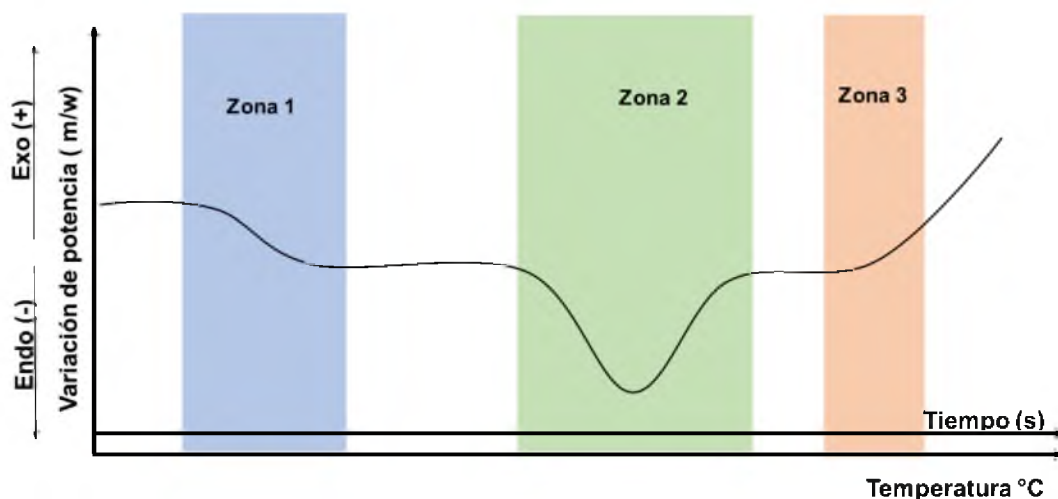


Figura 4.- Curva DSC, representación de transiciones de temperatura.

Fuente: <http://www.upv.es>

Difracción de rayos X (DRX): Es la técnica de caracterización usada para analizar la composición de materiales, medir el nivel de cristalinidad, identificación de fases, control de calidad, identificación de impurezas y la determinación de las constantes de la estructura cristalina para polímeros monocristalinos (Askeland et al., 1963).

La técnica de difracción más común utiliza una muestra pulverizada o policristalina que consiste en muchas partículas diminutas y orientadas al azar que son expuestas a una radiación de rayos x monocromática, el fenómeno se produce al interaccionar una haz de luz de una determinada longitud de onda (θ), con una sustancia cristalina, la difracción se basa en la dispersión coherente del haz de rayos x por parte de la materia y en la interferencia de las ondas que están en fase y que se dispersan en determinadas direcciones del espacio.

Para el desarrollo de los experimentos de difracción, se requiere de una fuente de rayos x, una muestra que puede ser un monocristal, polvo o una pieza sólida y un detector o contador para recoger los rayos x difractados (Figura 5).

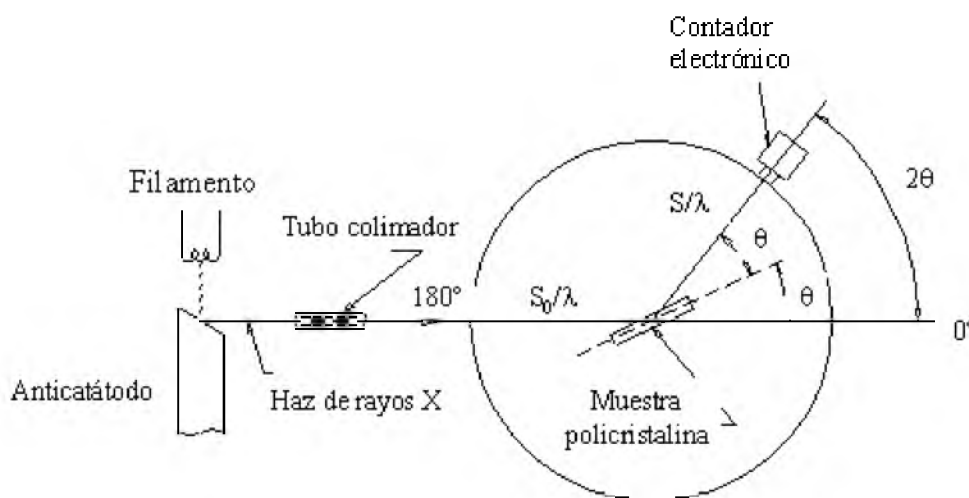


Figura 5.- Esquema de funcionamiento de un difractómetro de rayos X.

Fuente: <https://www.upv.es/materiales>

De esta exposición se obtiene información a partir de difractogramas que ayudan a analizar el sistema cristalino al que pertenece un material, con las intensidades de las reflexiones se puede determinar un análisis estructural ya que la geometría de los perfiles en los picos o máximos de difracción que se obtienen, permite determinar el tamaño de

los cristales que lo conforman, así mismo al realizar un análisis se pueden identificar los componentes de una mezcla.

Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR): La espectroscopía consiste en la medición e interpretación de fenómenos de absorción, dispersión o emisión de radiación electromagnética que ocurre en los átomos, moléculas y otras especies químicas.

La principal función de esta técnica es que mide la absorbancia de la luz infrarroja de una muestra, de donde se consigue una señal que se obtiene del detector al que se denomina espectro de reflexión de las bandas de los grupos funcionales de las sustancias orgánicas e inorgánicas que permite identificar la familia química que posee una sustancia.

En el diagrama de la figura 6 se muestra el funcionamiento general del equipo en esta técnica, que consiste en un haz proveniente de una fuente de luz que emite en toda la región infrarroja, lo que se convierte en luz de interferencia, esta incide sobre un divisor de haz el cual se divide en dos haces perpendiculares de igual energía, uno de los cuáles incide sobre el espejo móvil y el otro sobre el espejo fijo. Los haces son reflejados por ambos espejos y se recombinan al llegar al divisor de haz (Gomez & Murillo, 2015). Cuando el haz resultante pasa a través de la muestra, la luz de alguna longitud de onda es absorbida por la muestra y se convierte en la luz de interferencia que llega finalmente al detector, la información recabada se utiliza para obtener el interferograma, el cual es digitalizado para obtener el espectro infrarrojo de absorbancia o transmitancia que cambia con la frecuencia o la longitud de onda después de la transformada de Fourier de la computadora.

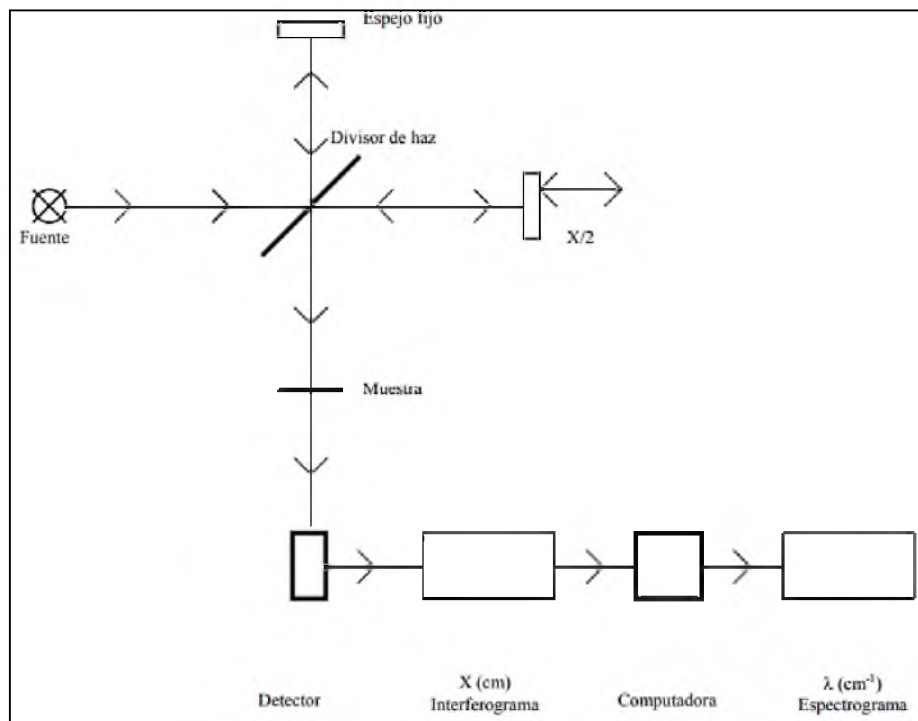


Figura 6.- Diagrama de funcionamiento de un espectrómetro por transformada de Fourier.

Fuente: (Gomez & Murillo, 2015)

2.5.- PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSIÓN

La extrusión es un proceso de compresión usado regularmente para polímeros termoplásticos y elastómeros, se implementa con dos finalidades, una es para conformar ciertas figuras/formas de manera continua que son cortadas a medidas estandarizadas para un uso final y la otra para procesar polímeros que posteriormente se utilizaran para otros procesos de conformado, proporciona además un mezclador excelente para los aditivos.

Las etapas del proceso de extrusión consisten en la alimentación de un material, plastificación del material de partida, hacer pasar el material plastificado a través de una boquilla/dado con la forma deseada, solidificación y posteriormente, bobinado o corte en las unidades deseadas.

Existen dos métodos de extrusión: por pistón y por husillo (Askeland et al., 1963).

- En el primero el material se extruye a través de una boquilla al ser empujado por un pistón, este método está limitado ala extrusión de algunos materiales muy sensibles al calor.
- El segundo método consiste en utilizar el movimiento continuo de un tornillo sin fin que gira en el interior de un cilindro caliente utilizado para fundir, transportar un material de una zona a otra y presionar el material fundido forzándolo a atravesar la boquilla que determina la forma final, y así obtener un producto largo y de sección transversal continua. En este caso se describen generalidades de este método, mismo que será el implementado para la extrusión del material compuesto en este proyecto.

En la figura 7 se observa el esquema de una máquina de extrusión en dónde se muestra el proceso completo para obtener un material para un uso final, en el caso de materiales que serán sometidos a otros procesos, el sistema de trabajo se modifica una vez que la pieza extruida para por el sistema de enfriamiento, para someterlo a un proceso de peletizado.

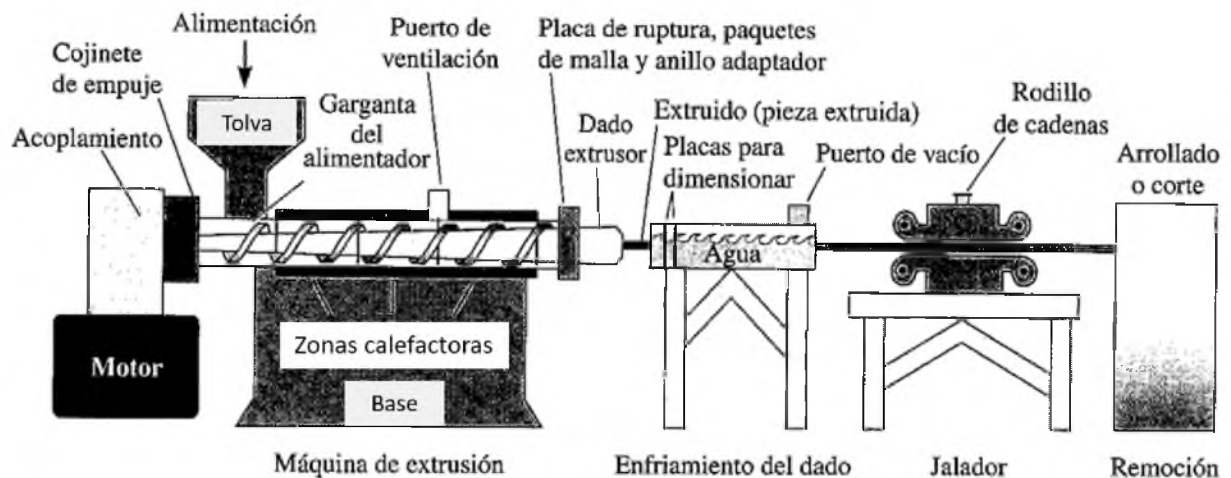


Figura 7.- Esquema general de trabajo de una máquina extrusora para procesar polímeros.

Fuente: (Askeland et al., 1963)

2.5.1.- COMPONENTES PRINCIPALES.

Cabezal y boquilla: El cabezal es la pieza al final del cilindro, la cual sujeta la boquilla y por ende al plato rompedor, el perfil interno de esta pieza debe facilitar el flujo del material hacia la boquilla. La función de la boquilla es la de moldear el material fundido.

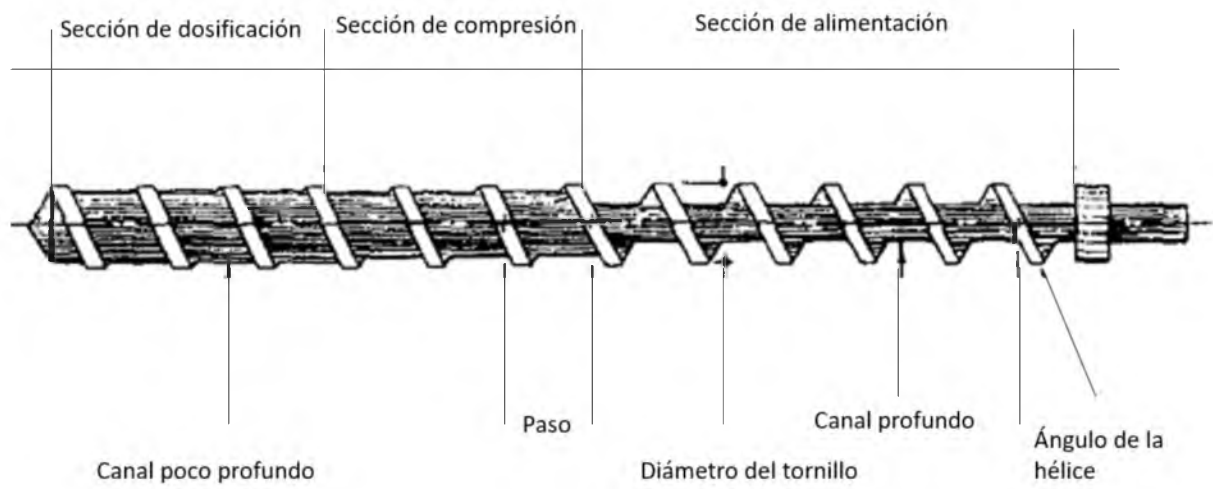
Plato rompedor: Se encuentra al final del cilindro y permite el paso del fundido a través de los orificios con los que cuenta, que además ayuda a disminuir el movimiento circular con el que el material va fluyendo, sujeta los tamices y se coloca entre el tornillo y la boquilla con el objetivo de evitar la contaminación del fundido.

Tamices: Se usa con el fin de proteger y evitar la obstrucción de la boquilla con partículas abrasivas, para impedir el paso de impurezas.

Tornillo/Husillo: Es el componente principal de una extrusora ya que el diseño que se implementa varía de acuerdo al tipo de material que se procesa, puede ser de diámetro constante o bien mixto que es el más implementado para la extrusión de filamentos de materiales compuestos.

El tornillo suele dividirse en tres secciones que son la de alimentación, compresión y dosificación (Figura 8).

- Alimentación: transporta el material desde la zona de alimentación hasta la zona de compresión.
- Compresión: En esta sección se disminuye gradualmente la profundidad del canal del tornillo que ayuda a la eliminación del aire atrapado y consecuentemente a la disminución de la porosidad en el extruido. Se produce además una contracción de volumen, lo que provoca un aumento en el nivel de cizalla sobre el fundido, lo que repercute en un mejor mezclado.
- Dosificación: La función es forzar al polímero fundido a través de la boquilla a una velocidad constante.



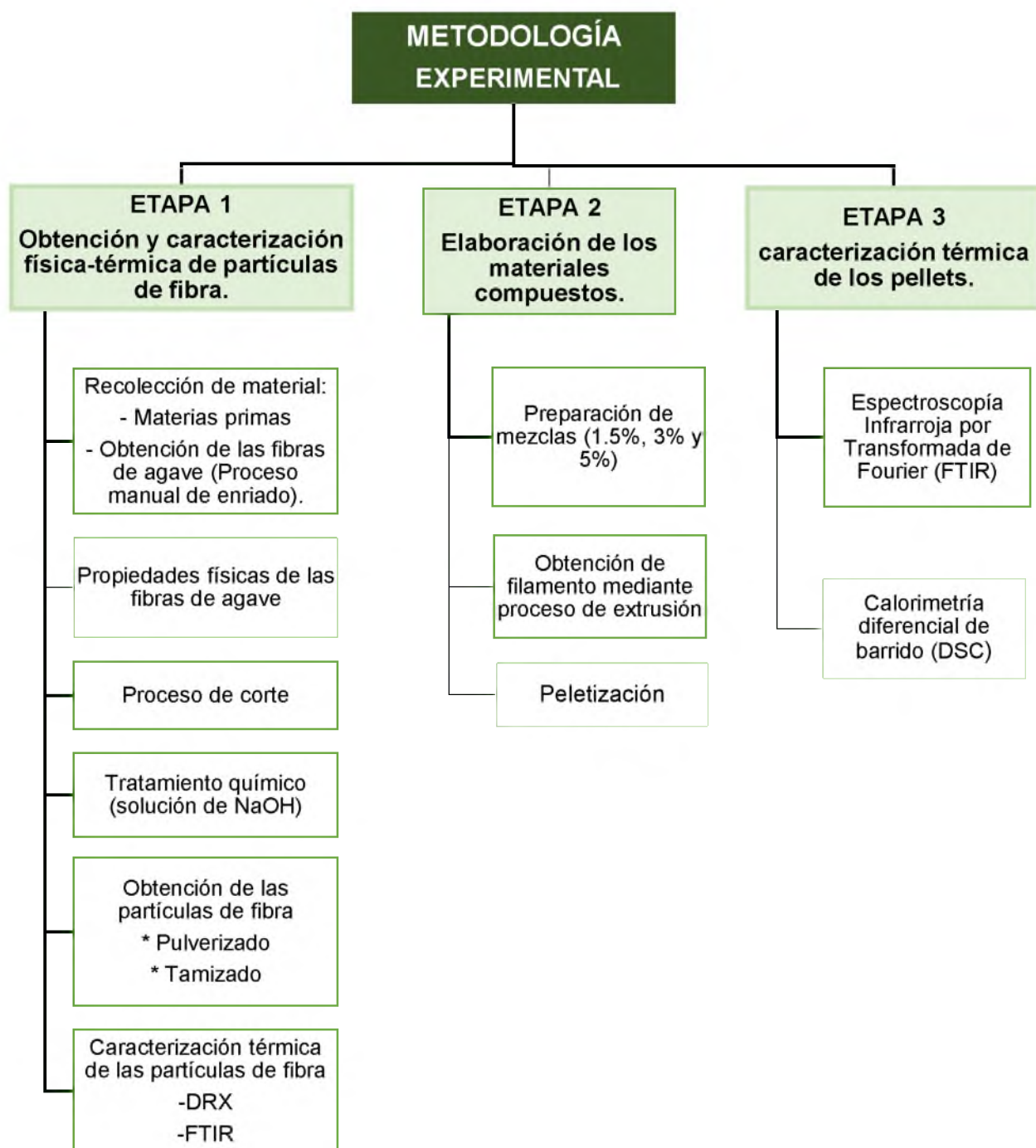
*Figura 8.- Partes de un tornillo de extrusión.
Fuente: (Askeland et al., 1963)*

CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

METODOLOGÍA DEL MODELO EXPERIMENTAL

El presente capítulo describe las condiciones bajo las cuales se desarrolló la parte experimental para obtener el material compuesto, incluye las técnicas y normas aplicadas en los procesos y ensayos realizados al material obtenido como se muestra en el siguiente esquema.



ETAPA 1: OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA-TÉRMICA DE PARTÍCULAS DE FIBRA.

3.1.- MATERIAS PRIMAS

Para la elaboración del material compuesto, se eligió como matriz polimérica, un polipropileno homopolímero diseñado para ser moldeado por inyección, con un punto de fusión de aproximadamente a los 160 °C de acuerdo a la información brindada por el proveedor, “Distribuidora Don Ramis S.A de C.V.”. En la tabla 1 se muestra las propiedades del material.

Tabla 1.- Especificaciones técnicas del polipropileno tipo comercial 4100 N

Especificación	Unidad	Método de prueba	Valor típico
Índice de fluidez	g/10min	ASTM-D-1238	11.4
Densidad	g/cm ³	ASTM-D-792	0.904
Dureza Rockwell	Escala R	ASTM-D-785	105
Módulo de flexión	Psi	ASTM-D-790-A	200000
Resistencia máxima a la tensión	Psi	ASTM-D-638	5100
Elongación máxima	%	ASTM-D-639	9
Impacto IZOD a 23°C	Ft*in/in	ASTM-D-256-A	0.5

Al mismo tiempo, como material de refuerzo se utilizó la fibra de las hojas del *Agave angustifolia* Haw proporcionada por la empresa Los músicos del mezcal S.A de C.V. productores de mezcal artesanal ubicados en Santiago Matatlán, Oaxaca que se localiza en la región de los Valles centrales, perteneciente al distrito de Tlacolula, se ubica en las coordenadas 16° 52' de latitud norte y 96°23' de longitud oeste, a una altitud de 1740 metros sobre el nivel del mar.

3.2.- OBTENCIÓN DE LAS FIBRAS DE *AGAVE ANGUSTIFOLIA* HAW

Las fibras que se utilizaron fueron extraídas de las hojas del agave mediante un proceso manual de enriado. En primer lugar se eliminaron los dientes y la espina terminal de la hoja con ayuda de un cuchillo, posteriormente se aplicó un proceso de machucado con la ayuda de un mazo de madera, golpeando las hojas en el sentido de las fibras y posteriormente en sentido transversal comenzando por la base y terminando por la punta, esto con el fin de desprender un porcentaje de la pulpa, en seguida, las hojas fueron sometidas a un proceso de fermentación microbiológica (maceración) durante tres días en un contenedor con aproximadamente 20 litros de agua con el fin de facilitar la extracción de las fibras.

El siguiente paso fue el raspado de las pencas que consiste en eliminar el material orgánico y dejar las fibras limpias, para ello, fue necesario apoyarse de un tronco de madera, sobre el cuál se apoyó una tabla de manera inclinada en la que se colocó la hoja y se raspó con ayuda de un hacha comenzando por la parte más ancha de la hoja, tal como se muestra en la figura 9.



*Figura 9.- Proceso de raspado de las pencas del agave.
Fuente: Los músicos del mezcal S.A de C.V*

Una vez obtenido el manojo de fibras, se enjuagaron con abundante agua para retirar los residuos y se procedió a tenderlos al aire libre para su secado, este proceso tuvo una duración de un día y una noche para eliminar parte de la humedad.

Empleando este proceso tradicional de enriado se generó una cantidad de 360 gramos de fibra extraída de nueve hojas de un agave de edad aproximada de 10 años, como se muestra en las figuras 10 y 11, respectivamente.



*Figura 10.- Pesaje de la fibra inicial en una báscula eléctrica de precisión.
Fuente propia.*



*Figura 11.- Fibras de Agave angustifolia Haw proporcionado por los productores de mezcal "Los músicos del mezcal" de Santiago Matatlán, Oaxaca.
Fuente propia.*

3.3.- PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS FIBRAS DE AGAVE

Inicialmente se tomó una muestra de 200 fibras que fueron separadas para llevar a cabo la caracterización física y térmica de las mismas.

3.3.1.- MEDICIÓN DE LA LONGITUD.

De las fibras separadas anteriormente, se tomó una muestra de 100 de manera aleatoria para la caracterización de longitudes, el procedimiento para la medición se describe a continuación:

Se colocaron una a una sobre una mesa como se muestra en la figura 12 y fueron estiradas por ambos extremos sujetando con cinta adhesiva en cada extremo, la medición se llevó a cabo una por una con la ayuda de un flexómetro con un rango de 0 a 3 metros, se fijó sobre un extremo de la fibra deslizando hasta el otro extremo para registrar la medida, como se muestra en la figura 13.



*Figura 12.- Muestra de 100 fibras colocadas para ser estiradas y medidas una por una.
Fuente propia.*



*Figura 13.- Medición de las fibras con un flexómetro.
Fuente propia.*

3.4.- PROCESO DE CORTE

Las fibras de agave obtenidas tenían una longitud inicial entre los 41.7 cm y los 70.1 cm, por lo que fue necesario reducir su longitud a un tamaño menor o igual a los 2 cm, se utilizaron tijeras para el corte manual con el fin de facilitar el proceso de pulverización con el molino y obtener las partículas finales (Figuras 14 y 15).



*Figura 14.- Proceso de corte manual de las fibras con tijeras.
Fuente propia.*



*Figura 15.- Fibra de Agave angustifolia Haw.
Fuente propia.*

Una vez terminado el proceso de corte, las fibras fueron almacenadas en bolsas herméticas para evitar la absorción de humedad tal como se muestra en la figura 16.



*Figura 16.- Fibras cortadas almacenadas en bolsas herméticas.
Fuente propia.*

3.5.- TRATAMIENTO QUÍMICO.

Las fibras extraídas de las hojas del agave mezcalero de la especie *Angustifolia* Haw fueron sometidas a un tratamiento químico para eliminar los residuos provenientes de su extracción, así como para mejorar la superficie de las fibras, con el fin de obtener una mejor interacción fibra-matriz en el proceso de la elaboración del material compuesto.

Para el tratamiento químico se utilizó un total de 165 gramos de fibra cortada, y una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 5% respecto al peso de la fibra.

Preparación de las muestras.

Las fibras cortadas fueron pesadas en una báscula digital marca ADAM modelo CQT2000, una vez obtenido el peso total, se dividió en dos partes, el 50% se resguardó en una bolsa hermética para su uso posterior y el otro 50% se dividió en dos partes colocando cada una en vasos de precipitado de 500 ml como se muestra en las figuras 17 y 18, se etiquetaron las muestras para llevar un mejor control durante el proceso. Para la preparación de la solución se pesaron 5 g de NaOH para cada muestra (Figura 19).



Figura 17.- Pesado de las fibras.
Fuente propia.

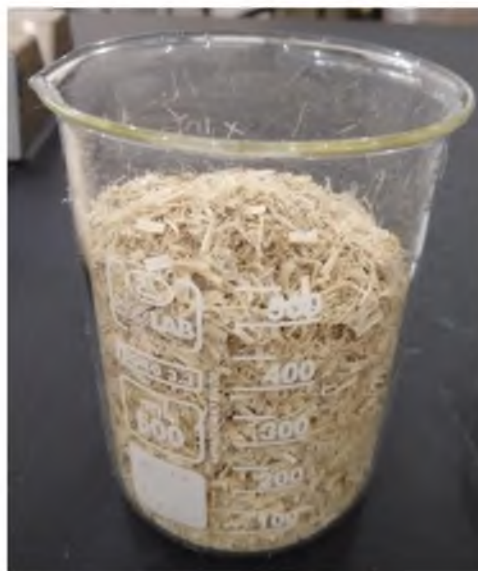
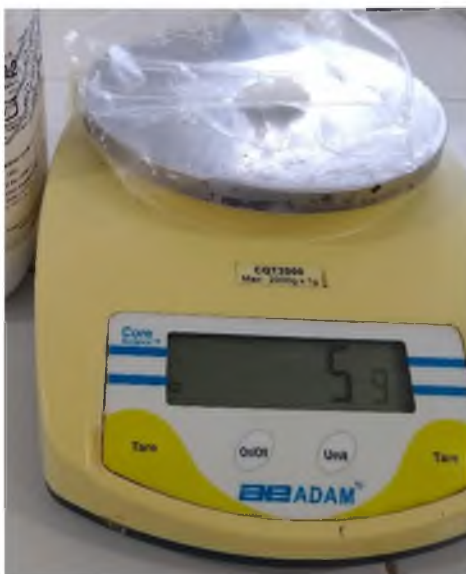


Figura 18.- Preparación de muestras en
vasos de precipitado.
Fuente propia.



*Figura 19.- Pesado de hidróxido de sodio para cada muestra.
Fuente propia.*

Preparación de la solución.

La solución fue preparada en dos partes iguales, en dos vasos de precipitado de 500 ml se colocó 500 ml de agua destilada se vertió 5 g de NaOH en cada uno y se agitó la solución con un agitador de vidrio hasta homogeneizar la mezcla. Este proceso se repitió para las dos muestras (Figura 20).



*Figura 20.- Homogeneización de la solución de
agua destilada - NaOH.
Fuente propia.*

Mercerizado

La solución se vació en cada uno de los vasos de precipitado (Figura 21) que contenían la fibra, quedando las muestras de la siguiente manera:

- Muestra 1: 82.5 gramos de fibra + 500 ml de agua destilada + 5 gramos de NaOH.
- Muestra 2: 82.5 gramos de fibra + 500 ml de agua destilada + 5 gramos de NaOH.

Las muestras permanecieron en tratamiento un total de seis horas, durante las primeras cuatro horas, se removieron cada 20 minutos con el fin de que las fibras quedaran hidratadas en su totalidad y que el tratamiento fuera uniforme, las siguientes dos horas permanecieron intactas en la solución (Figura 22).



*Figura 21.- Vaciado de solución.
Fuente propia.*



*Figura 22.- Removido de fibras
sumergidas en solución de NaOH.
Fuente propia.*

Lavado de las fibras.

Una vez cumplidas las seis horas del tratamiento, se escurrieron las muestras con mucho cuidado y se enjuagaron, este proceso consistió en verter 500 ml de agua destilada en cada muestra, removerlo, agitarlo y escurrirlo, este mismo proceso se repitió por 5 veces hasta conseguir eliminar el residuo del tratamiento tal como se muestra en las figuras 23 y 24.



*Figura 23.- Primer escurrimiento de las fibras.
Fuente propia.*



*Figura 24.- Removido de fibras sumergidas en agua destilada.
Fuente propia.*

Posteriormente, con el fin de remover el exceso de NaOH adherido a las fibras, se prepararon dos tantos de solución con 500 ml de agua destilada y 10 ml de ácido acético (Figura 25), se movió hasta mezclar bien la solución y se vació una en cada muestra, se removió hasta mezclar y se dejaron por 40 minutos, removiendo cada 20 minutos, al término de 40 minutos se escurrieron las fibras y se cubrieron dejándolas almacenadas a temperatura ambiente por un periodo de catorce horas.



*Figura 25.- Preparación de la solución de ácido acético.
Fuente propia.*

Finalmente, las fibras fueron enjuagadas, este proceso consistió en verter 500 ml de agua destilada en cada muestra, removerlo, agitarlo y escurrirlo, este proceso se repitió 5 veces (Figura 26). Una vez terminado el lavado, las muestras permanecieron una hora almacenadas a temperatura ambiente antes de iniciar el proceso de secado (Figura 27).



*Figura 26.- Último escurrimiento de las fibras.
Fuente propia.*



*Figura 27.- Fibras escurridas listas para el proceso de secado.
Fuente propia.*

Proceso de secado.

Para este proceso se utilizó un horno de convección marca Fisher Scientific, las muestras ya tratadas químicamente fueron pesadas antes de iniciar este proceso, en seguida, fueron colocadas al interior del horno a una temperatura de 90°C como se muestra en la figura 28. Las muestras de fibra tratada, permanecieron un periodo total de 31 horas dentro del horno a una temperatura de 90 °C y un total de 42 horas dentro del horno a temperatura ambiente, esto dividido en cuatro días, distribuidas como se muestra en la tabla 2.



*Figura 28.- Ingreso de muestras de fibras tratadas para su secado en horno de convección marca Fisher Scientific.
Fuente propia.*

Tabla 2.- Distribución de horas del proceso de secado de fibras tratadas químicamente.

Día	Tiempo en horno a 90 °C (horas)	Tiempo a temperatura ambiente. (horas)
1	8	14
2	10	14
3	10	14
4	3	0

Las muestras, se fueron monitoreando cada hora durante el primer día, removiendo y pesando cada una para obtener un mejor control de la pérdida de humedad y llegar al peso inicial de la muestra a antes de ser tratada. Durante los siguientes 3 días se monitorearon cada 2 horas.

Durante el primer día, el 50% de la fibra resguardada inicialmente, es decir la fibra no tratada, se dividió en dos partes de 50 y 50 % y fueron colocadas en vasos de precipitado quedando dos muestras con 82.5 g de fibra cada una, las cuáles fueron ingresadas al horno por un periodo de dos horas a 90 °C, junto con las muestras de fibra tratada que ya se encontraban en el proceso (Figura 29).

Ambas muestras fueron nombradas y etiquetadas para su reconocimiento como fibras tratadas (F.T) y fibras no tratadas (F.N.T).

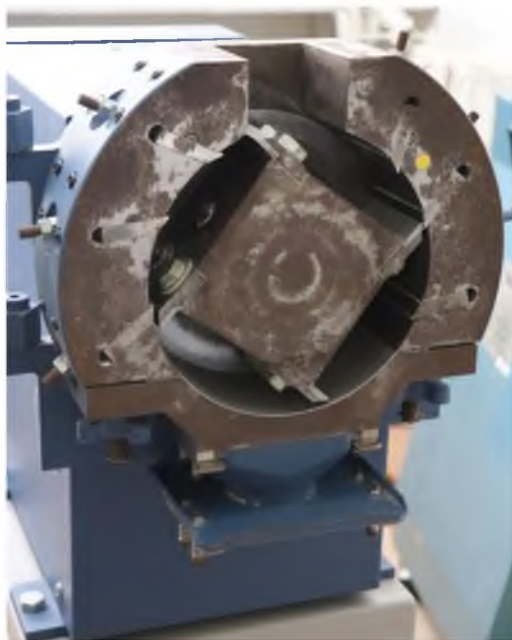


*Figura 29.- Ingreso de muestras de F.T y F.N.T para su secado en horno de convección.
Fuente propia.*

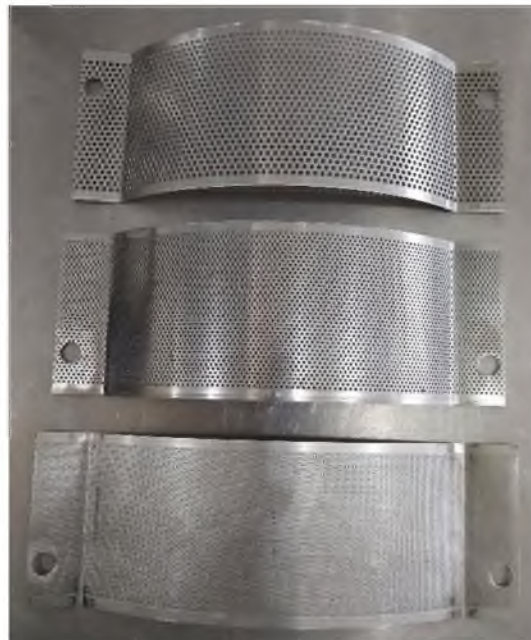
3.6.- OBTENCIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE FIBRA

3.6.1.- PULVERIZACIÓN DE LAS FIBRAS DE *AGAVE ANGUSTIFOLIA* HAW

La pulverización de las fibras tratadas (F.T) y fibras no tratadas (F.N.T) se realizó con el uso de un molino Thomas Wiley Mill Modelo 4 con 1 HP de fuerza, el cuál gira a una velocidad de 800 rpm a 60 Hz. El mecanismo del molino para triturar las muestras consiste en alimentar desde una tolva en la parte superior de este, abriendo el paso para que la muestra caiga en el camino de cuatro cuchillas giratorias accionadas por un motor eléctrico (Figura 30), que al girar en sentido contrario a las seis cuchillas fijas del molino logra triturar, en seguida, las partículas resultantes pasan a través de una malla de acero propias del equipo, que van de los 0.5 mm, 1mm y 2mm como se muestra en la figura 31, estas mallas se colocan una a la vez, con forme avanza el proceso de corte. Finalmente, las partículas se resguardan en un container mismo del equipo.



*Figura 30.- Sistema de cuchillas del molino
Thomas Wiley.
Fuente propia.*



*Figura 31.- Tamices del equipo. Malla de
2mm, 1mm y 0.5mm, de arriba - abajo,
respectivamente.
Fuente propia.*

El proceso se inició con la muestra de fibra no tratada y posteriormente la muestra de fibra tratada, consistió en tres etapas que a continuación se describen:

Etapas 1.- Pulverizado con malla de 2 mm.

Una vez instalado cada parte del equipo y colocado la malla de 2 mm, se procedió a alimentar el molino mediante la tolva, con muestras de fibra de 5–10 g aproximadamente como se muestra en la figura 32, hasta terminar los 165 g de F.N.T.

Una vez terminado el total de la muestra, se desarmó el equipo y se limpió para extraer la fibra que no se alcanzó a moler (Figura 33), se retiró el contenedor de la fibra y se vació en su totalidad en un vaso de precipitado (Figura 34 y 35) para enseguida repetir el proceso una vez más. Una vez culminada la segunda vuelta, el molino se volvió a desarmar y a limpiar en su totalidad para continuar con la siguiente etapa.

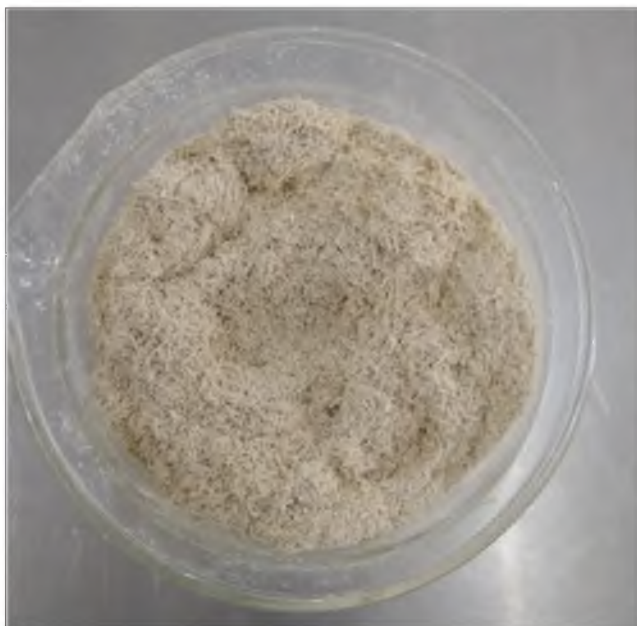
Este proceso, se realizó dos veces con la malla de 2mm. La duración aproximada fue de 90 minutos.



*Figura 32.- Alimentación con muestra de F.N.T mediante tolva.
Fuente propia.*



*Figura 33.- Limpieza y extracción de fibra restante.
Fuente propia.*



*Figura 34.- Partículas obtenidas de la primera etapa de molienda de F.N.T
Fuente propia.*

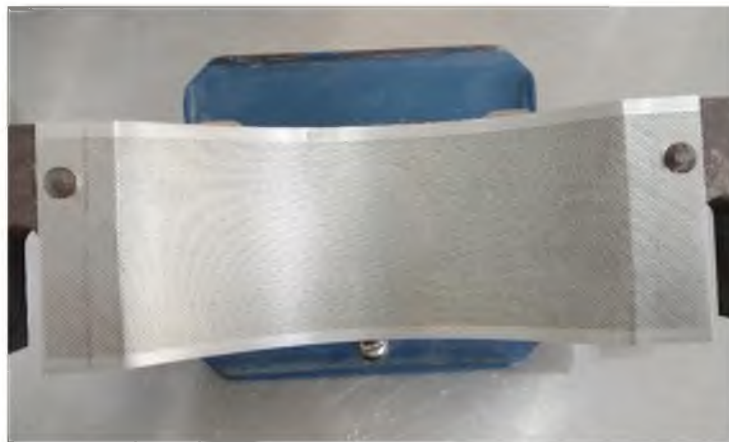


*Figura 35.- Partículas obtenidas de F.T en la primera etapa de molienda.
Fuente propia.*

Etapa 2.- Pulverizado con malla de 1mm.

Se repitió el mismo proceso de pulverizado que en la etapa anterior, esta vez, con el cambio de malla de 1 mm (Figura 36), alimentando el equipo con la muestra del mismo tamaño de 5-10 g, una vez terminado el total de la fibra, se desarmó el equipo, se extrajo la fibra que quedó dentro y se limpió el equipo. Se vació el contenedor y se volvió a armar el molino para dar la segunda vuelta con esta misma malla.

Finalmente, se vació el contenedor del molino y se volvió a desarmar el equipo para limpiarlo y continuar con la última etapa del proceso.



*Figura 36.- Cambio de malla.
Fuente propia.*

Etapa 3.- Pulverizado con malla de 0.5mm.

Las partículas de F.N.T obtenidas de las dos etapas anteriores, se molieron nuevamente, esta vez con el cambio de malla de 0.5 mm, alimentando el equipo con muestras de los 5-10 g, el proceso fue el mismo descrito anteriormente, realizando la molienda con esta malla dos veces.

Finalmente, la cantidad total de partículas obtenidas de F.N.T se vaciaron y resguardaron para proceder con la limpieza del equipo y continuar con la pulverización de las fibras tratadas (F.T).

Para la muestra de F.T se repitió todo el proceso anterior descrito en las tres etapas, sin embargo, cabe destacar que se observó que los tiempos de molienda para esta muestra se redujeron considerablemente a 60 minutos por cada etapa de dos ciclos.

3.6.2.- TAMIZADO DE LAS PARTÍCULAS.

Para este proceso tanto para las partículas de fibra tratadas y no tratadas se utilizaron tamices estandarizados bajo la norma A.S.T.M.-E-11 con número de malla de 50, 100 y 200 y una abertura de 0.300, 0.150 y 0.075 micras respectivamente.

El proceso consistió en colocar los tamices según el número de malla de mayor a menor abertura, comenzando de arriba - abajo con el tamiz de malla 50, 100 y 200 como se observa en la figura 37 respectivamente. Se inició con el tamizado de las partículas de la muestra de fibra no tratada.



*Figura 37.- Tamices ordenados de mayor a menor abertura.
Fuente propia.*

Al quedar el tamiz de malla 50 por encima de los demás, a este se le suministró con muestras de aproximadamente 10 g y se vibraba de manera manual hasta ir logrando que cada muestra pasara finalmente por todos los tamices, el tiempo aproximado de vibración fue de 80 minutos.

Una vez terminado el proceso, se dejó reposar los tamices para que las partículas asentaran bien en cada tamiz, al cabo de un tiempo aproximado de 10 minutos, se procedió a separar y a pesar las partículas obtenidas de cada uno, registrando partículas con diferentes tamaños.

Posteriormente se procedió a limpiar todos los tamices para proceder con el tamizado de la muestra de partículas de fibras tratadas, repitiendo el proceso explicado en su totalidad.

3.7.- CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LAS PARTÍCULAS

3.7.1.- ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).

Se realizó el análisis de difracción de rayos X con la finalidad de evaluar el efecto del tratamiento químico sobre la cristalinidad de las partículas de celulosa como material de refuerzo. Las muestras fueron analizadas en el difractómetro de rayos X D8 ADVANCE BRUKER AXS (figura 38), con un voltaje de 40 KV y una corriente de 30 mA, en un intervalo de 5° - 50° en 2θ .

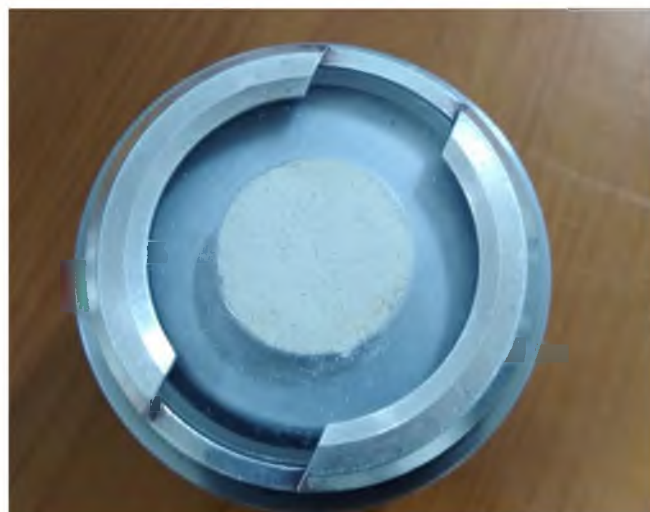


*Figura 38.- Difractómetro de rayos X D8
ADVANCE BRUKER AXS.
Fuente propia.*

El proceso para la realización de este análisis a las partículas de celulosa tratadas y no tratadas consistió en tomar una muestra considerable de partículas para colocarlas sobre el porta muestras del equipo hasta cubrirla en su totalidad, se compactó con ayuda de una espátula y un portaobjetos como se muestra en la figura 39, se limpió y se colocó en el cargador (Figura 40) para finalmente introducirlo en la cabina y correr el análisis.



*Figura 39.- Muestra compactada con ayuda de un porta objetos.
Fuente propia.*



*Figura 40.- Cargador de porta muestra del difractómetro de rayos X.
Fuente propia.*

Los datos del análisis se obtuvieron del software propio del equipo, D8 Tools y se procesaron en el software OriginPro 8.5 para finalmente ser analizados e interpretados

3.7.2.- ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).

Se realizó este análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier en un espectrómetro FT-IR marca PerkinElmer modelo Spectrum 100, el cual cuenta con un accesorio de muestreo ATR universal de la misma marca (Figura 41)



*Figura 41.- Espectrómetro FT-IR marca PerkinElmer modelo Spectrum 100 con accesorio de muestreo ATR universal.
Fuente propia.*

El proceso para la realización de este análisis consistió en configurar los parámetros en el software propio del equipo con la finalidad de regular los rangos y estabilizar la energía del equipo. Posteriormente, con la ayuda de una espátula, se tomó una pequeña muestra de las partículas de fibra para colocarlas en el porta muestras del equipo como se puede observar en la figura 42, se alineó el accesorio sobre la muestra (figura 43) y se inició con apretarlo poco para ejercer la presión sobre la muestra hasta estabilizarlo aproximadamente en un 90 % y así poder garantizar un mejor resultado. Una vez estabilizado, se corrió el análisis hasta obtener los espectros correspondientes.



*Figura 42.- Muestra de partículas colocadas en el porta muestra del espectrómetro.
Fuente propia.*



*Figura 43.- Accesorio alineado sobre la muestra.
Fuente propia.*

ETAPA 2: ELABORACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.

3.8.- PREPARACIÓN DE MEZCLAS PARA ELABORACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO.

Se describe el proceso realizado para la preparación de las mezclas de fibra - matriz que se usaron para la obtención de los pellets del material compuesto.

Se utilizaron siete frascos de vidrio que fueron lavados con detergente y colocados a secar a temperatura ambiente por un periodo de tiempo aproximado de 6 horas, tal como se muestra en la figura 44

Para las mezclas se realizaron los cálculos para obtener las cantidades de partículas de fibra a pesar para cada concentración, en este caso, considerando la cantidad de 500 g de polipropileno como base para cada una de las muestras, obteniendo así las siguientes proporciones de refuerzo – matriz como se muestra en la tabla 3.



*Figura 44.- Lavado y secado de frascos de almacenamiento de mezclas.
Fuente propia.*

Tabla 3.- Registro de proporciones de las mezclas según porcentaje de concentración.

Muestra	Nomenclatura	Concentración %	Contenido (g)	
			Polipropileno (PP)	Partículas de fibra
1	M1: F.N.T-1.5	1.5	500	7.5
2	M2: F.N.T-3	3	500	15
3	M3: F.N.T-5	5	500	25
4	M4: PP-100	100	500	0
5	M5: F.T-1.5	1.5	500	7.5
6	M6: F.T-3	3	500	15
7	M7: F.T-5	5	500	25

En seguida para preparar las mezclas se utilizó la báscula digital Core Balance, modelo 22ADAM y se realizó de la siguiente manera:

Se colocó cada botella en la báscula, se pesó y se taró para luego agregar 500 g de polipropileno y así sucesivamente con cada una de los siete frascos (figuras 45).

Posteriormente se realizó el pesado por separado de las cantidades de partículas en las diferentes concentraciones como se describe en la tabla 5, tanto para las muestras de fibra no tratada y fibra tratada utilizando una balanza electrónica de precisión OHAUS, modelo COMPASS, para mayor exactitud y en vasos de precipitado para posteriormente agregarlos a los frascos como se muestra en la figura 46 y 47.



*Figura 45.- Frasco tarado listo para agregar muestra de polipropileno (PP).
Fuente propia.*



*Figura 46.- Pesado de partículas de fibra.
Fuente propia.*



*Figura 47.- Vaciado de partículas para realizar el mezclado.
Fuente propia.*

Se etiquetaron cada uno de los frascos con la concentración de refuerzo correspondiente de acuerdo a la nomenclatura de la tabla 3, finalmente fueron agitados durante un tiempo

aproximado de 20 minutos cada uno, hasta conseguir una mezcla y adherencia electrostática homogénea entre los pellets de polipropileno y las partículas, con la finalidad de conseguir una mejor interacción (Figura 48).



*Figura 48.- Mezclas de polipropileno - partículas de fibra en diferentes concentraciones.
Fuente propia.*

3.9.- OBTENCIÓN DE FILAMENTO

El proceso de obtención del filamento del material compuesto se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Química Instrumental perteneciente a la Universidad del Papaloapan campus Tuxtepec. Se utilizó un equipo extrusor marca BEUTELSPACHER MODELO E1930 como se muestra en la figura 49 con un sistema de enfriamiento propio del equipo, implementando un husillo mixto destinado para la extrusión de materiales compuestos en este laboratorio (Figura 50).



*Figura 49.- Extrusora marca BEUTELSPACHER MODELO E1930, con su sistema de enfriamiento.
Fuente propia.*



*Figura 50.- Husillo implementado para extrusión de materiales compuestos UNPA (campus Tuxtepec).
Fuente propia.*

Se reportan tres concentraciones diferentes de mezcla en este proceso, mismas que fueron sometidas a pruebas para analizar el material obtenido bajo distintas condiciones con el fin de obtener un material de mejores características, inicialmente se realizaron pruebas con el material puro (PP) con los parámetros de referencia registrados en (De Jesús Angulo, 2020), que son los siguientes, Temperatura Zona de alimentación 135°C, Temperatura Zona de plastificación 140°C, Temperatura Zona de mezclado 140 °C, con una velocidad de 100 revoluciones por minuto (RPM), sin embargo, debido a dificultades observadas durante estas pruebas y a la recomendación del personal técnico del

laboratorio, se optó por realizar una serie de variaciones en los parámetros de extrusión, posteriormente se analizó el material obtenido para poder decidir las condiciones óptimas para extruir las muestras finales.

Finalmente, las mezclas de polipropileno - refuerzo (partículas de fibras de agave) fueron procesados en dos ciclos de extrusión bajo las siguientes condiciones; Temperatura Zona de alimentación 100°C, Temperatura Zona de plastificación 170°C, Temperatura Zona de mezclado 150 °C, con una velocidad de 50 RPM, como lo muestra la figura 51. Con el siguiente proceso, inicialmente se configuraron los parámetros del equipo con las temperaturas óptimas para el material antes mencionadas, posteriormente, a través de la tolva se alimentó de la mezcla en dos tantos debido a la cantidad de la misma, homogeneizándolas con la ayuda de una espátula, se esperó a que el material comenzara a fluir por la salida de la boquilla del extrusor para jalarlo y hacerlo pasar por el sistema de enfriamiento del equipo y continuamente almacenarlo (Figuras 52 - 55).

Se inició con la extrusión de la muestra de PP puro (PP-100), seguida las mezclas con partículas de fibra no tratada y finalmente de fibra tratada, sometiendo todas las muestras al primer ciclo en una sola corrida, el proceso se replicó para el segundo ciclo, entre cada muestra se realizó la limpieza del equipo con material puro para evitar la contaminación de las mismas.



*Figura 51.- Condiciones utilizadas para la extrusión del filamento final.
Fuente propia.*



*Figura 52.- Vaciado de mezcla PP + Partículas de fibra, para primer ciclo de extrusión.
Fuente propia.*



*Figura 53.- Filamento extruído en sistema de enfriamiento.
Fuente propia.*



*Figura 54.- Alimentación con pellets de material compuesto para segundo ciclo de extrusión.
Fuente propia.*



*Figura 55.- Filamentos finales con segundo ciclo de extrusión, listos para proceso de peletizado.
Fuente propia.*

Cabe mencionar que cada una de las muestras sometidas al proceso de extrusión, fueron secadas por un tiempo de una hora y treinta minutos en un horno de convección modelo FELISA FE-291, a 50°C como muestra la figura 56, para eliminar la humedad que las muestras pudieron haber tomado durante el tiempo de almacenamiento.



*Figura 56.- Secado de muestras de mezcla
PP + Partículas de fibra.
Fuente propia.*

3.10.- PELETIZACIÓN

El proceso de peletización de los filamentos se llevó a cabo en una peletizadora con motor, BEUTELSPECHER 290509 – BALDOR-DC DRIVE de 1 HP de fuerza, perteneciente al Laboratorio de Química Instrumental de la UNPA campus Tuxtepec.

Este proceso se llevó a cabo a una velocidad en un rango de 25 – 40 RPM, lo que se fue variando debido a la rigidez de los filamentos dependiendo de la concentración de refuerzo contenido, para esto, se colocaron los filamentos en la entrada del sistema de corte del equipo y se estiraron sin ejercer demasiada fuerza para ayudar a que el filamento no se atorara en las cuchillas (Figura 57). Se inició con los filamentos del

material puro, en seguida el material compuesto con partículas de fibras no tratadas y finalmente el compuesto con partículas de fibras tratadas, entre cada concentración el equipo se limpió con PP para evitar contaminar las demás muestras.

Para la recolección de los pellets resultantes de cada concentración, se colocó en la parte inferior una bolsa para acumularlo como se muestra en la figura 58, posteriormente se pesaron y almacenaron en frascos de vidrio y bolsas herméticas para obtener el rendimiento final del material (figura 59).



*Figura 57.- Filamentos de material compuesto en proceso de peletización.
Fuente propia..*



*Figura 58.- Almacenamiento de pellets durante proceso de peletización.
Fuente propia.*



*Figura 59.- Pellets finales obtenidos de las tres concentraciones de partículas de fibra reportadas.
Fuente propia.*

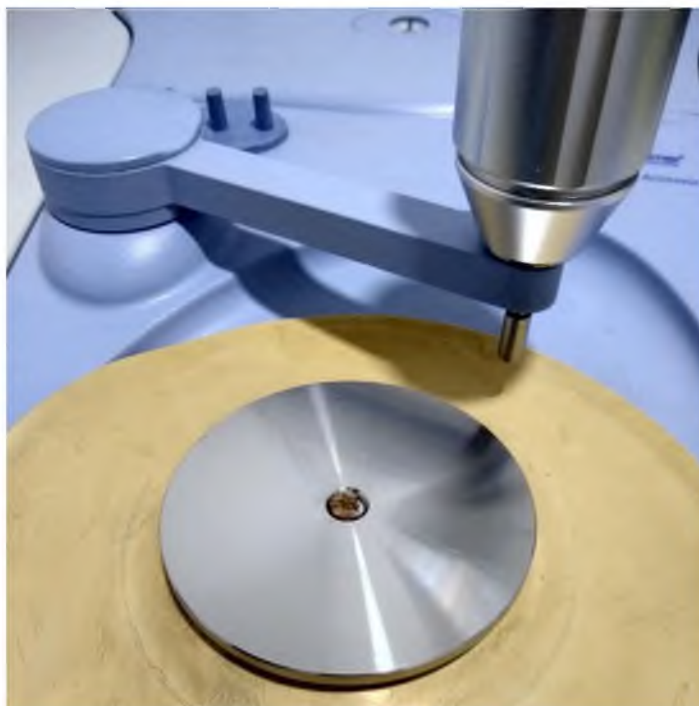
ETAPA 3: CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL MATERIAL COMPUESTO

Durante esta etapa, se caracterizaron los pellets del material compuesto obtenidos con el equipo para ambas caracterizaciones pertenecientes al centro de investigaciones científicas de la UNPA campus Tuxtepec.

3.11.- ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).

Para el análisis FTIR de los pellets del material compuesto se utilizó el espectrómetro FT-IR marca PerkinElmer modelo Spectrum 100, el cual cuenta con un accesorio de muestreo ATR universal de la misma marca. Se desarrolló de la misma manera que para el análisis de las partículas de fibra de agave.

Durante este proceso, se corrieron los análisis al menos dos veces para obtener mejores resultados en los espectros finales para cada concentración, en un intervalo espectral de los 4000 cm^{-1} - 500 cm^{-1} . Se procuró colocar los pellets en el porta muestra sin espacios libres para una mejor lectura (Figura 60).



*Figura 60.- Pellets acomodados en porta muestras para mejor lectura en la corrida del análisis.
Fuente propia.*

3.12.- CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC).

En esta caracterización se utilizó un calorímetro diferencial de barrido marca TA modelos 250 mostrado en la Figura 61, vinculado al software del equipo para el control de parámetros para desarrollar los análisis.

Para medir la transición del material al ser sometido a cambios de temperatura, se utilizó una rampa de temperatura de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ en una atmósfera inerte de nitrógeno de $60\text{ ml}/\text{min}$. El análisis se desarrolló en un intervalo de temperaturas de $-60^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$.

El peso de la muestra de referencia que se usó fue de 2.6 mg , variando a los 2.5 mg en el caso de algunas muestras.



*Figura 61.- Calorímetro diferencial de barrido TA-modelo 250.
Fuente propia.*

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1.- PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS FIBRAS.

En la tabla 4 podemos observar el resultado de las mediciones realizadas a la muestra de 100 fibras aleatorias de agave para determinar la longitud promedio inicial con la cual fueron obtenidas de los campos de cultivo de Santiago Matatlán, Oaxaca. Del análisis estadístico de los datos se determinó la longitud promedio de 54.3 ± 5.1 cm, encontrándose en su mayoría en un intervalo de 49.2 cm hasta un máximo de 59.4 cm, sin embargo, se puede concluir que la variabilidad en las longitudes de las fibras puede referirse a la posición de las hojas del maguey y al proceso manual de extracción de las mismas ya que la aplicación de la fuerza en su obtención no es regulada (Silva et al., 2009).

Tabla 4.- Registro de longitudes de la muestra de 100 fibras aleatorias.

N° fibra	Longitud cm	N° fibra	Longitud cm	N° fibra	Longitud cm	N° fibra	Longitud cm	N° fibra	Longitud cm
1	60.2	21	69.5	41	54.3	61	55.1	81	50.8
2	48.9	22	60.7	42	57.6	62	55.8	82	53.8
3	43.7	23	61.4	43	57.3	63	56	83	55.4
4	49.6	24	63.3	44	52.8	64	55.1	84	52.7
5	54.2	25	67.4	45	45.6	65	56.7	85	58.4
6	51.3	26	54.1	46	43.1	66	55.9	86	57.1
7	45.8	27	70.1	47	53.4	67	56.6	87	58.2
8	57.2	28	50	48	57.5	68	58.5	88	57.6
9	50.8	29	58.6	49	48.8	69	53.5	89	54.3
10	59.6	30	48.7	50	57.2	70	57.4	90	55.1
11	41.7	31	56.6	51	52.8	71	56.5	91	49.7
12	51.9	32	45.8	52	57.4	72	55.7	92	55.8
13	46.6	33	53.7	53	51.4	73	55.3	93	55.9
14	48.4	34	53.8	54	52.5	74	46.8	94	57.2
15	62.6	35	48.5	55	57	75	46.2	95	56.7
16	48.7	36	49.3	56	45.8	76	56	96	56.7
17	53.5	37	59.7	57	52	77	54.9	97	57
18	49.7	38	57.2	58	57.9	78	54	98	57
19	50.1	39	57	59	50.9	79	56.1	99	56.9
20	48.3	40	52.2	60	55.3	80	55.8	100	57.2

4.2.- PULVERIZADO Y TAMIZADO DE LAS PARTÍCULAS

Como resultado del pulverizado de las fibras se observó que el tiempo de molienda para las fibras tratadas (F.T) se redujo considerablemente a un tiempo de 60 minutos por cada etapa del proceso, en comparación a los 90 minutos de proceso de las fibras no tratadas (F.N.T), esto se puede atribuir a la rigidez y la reducción de impurezas en las mismas, resultado del tratamiento químico al que fueron sometidas.

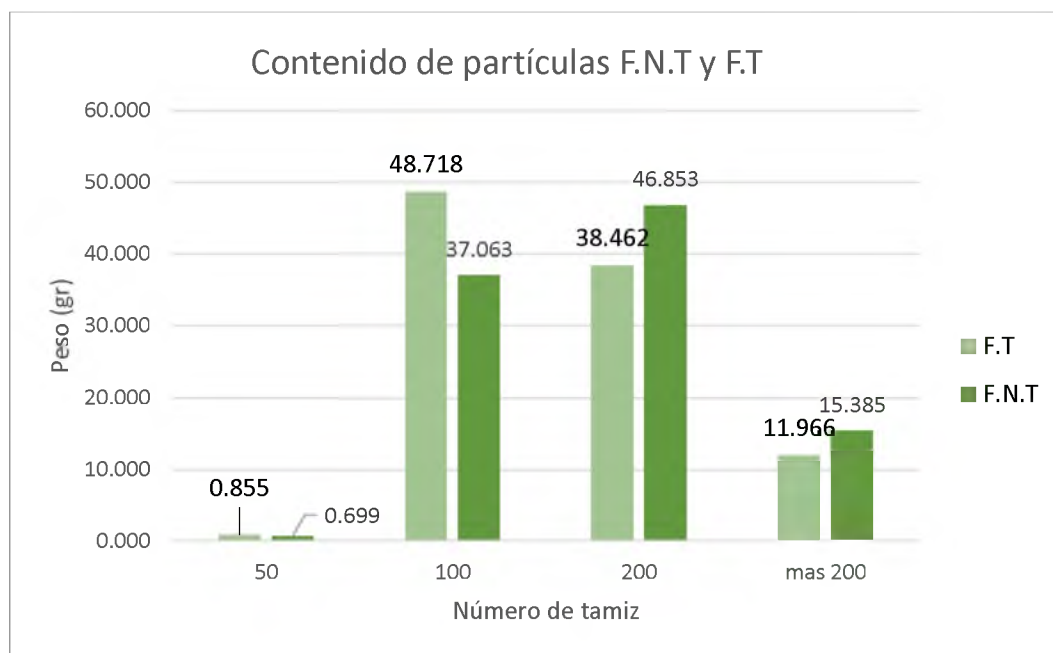
Finalmente, del proceso de tamizado se obtuvieron las partículas de fibra con diferentes tamaños registrados en la siguiente tabla 5.

Tabla 5.- Registro de partículas obtenidas del proceso de tamizado.

Tamiz	Abertura del tamiz (µm)	Peso (gramos)		Equivalencia en %	
		F.N.T	F.T	F.N.T.	F.T
50	300 (>300)	1	1	0.699	0.854
100	150 (≤300 y >150)	53	57	37.062	48.717
200	75 (≤150 y >75)	67	45	46.853	38.461
<200	≤75	22	14	15.384	11.965

Del proceso de tamizado podemos concluir que como resultado se obtuvieron partículas de celulosa con diferentes tamaños en un rango de 300 µm a <75µm. Como se puede observar en la tabla 3, en el tamiz número 100 de abertura 150 µm, fue en dónde pasó la mayor cantidad de partículas tanto de F.N.T y F.T, seguido del tamiz número 200 de abertura de 75 µm para ambas muestras. Por lo que se concluye que el material compuesto está conformado en su mayoría por partículas de celulosa de *Agave Angustifolia* Haw de entre los 150 µm a menores de 75 µm, específicamente la muestra de F.N.T en un 83.91% y la F.T en un 87.17% como se muestra en la siguiente gráfica en la figura 62.

Cabe destacar que el material compuesto desarrollado en este trabajo está compuesto por partículas en su mayoría más pequeñas que el material registrado en De Jesús Angulo (2020).



*Figura 62.- Gráfica comparativa de los porcentajes de tamaño de partículas por las cuáles está conformado el material compuesto.
Fuente propia.*

Con respecto a la pérdida de material inicial a la cantidad final de partículas obtenidas en peso, hubo una pérdida del 13% para la F.N.T y 29% para F.T que se debe tanto a la eliminación de las impurezas en la F.T y a las pérdidas durante los procesos de pulverizado y tamizado.

4.3.- CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LAS PARTÍCULAS.

4.3.1.- DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

Los patrones de difracción de rayos x de las partículas de *Agave angustifolia* Haw se muestran en las figuras 63 y 64 para las partículas de fibra no tratadas y fibras tratadas químicamente, obtenidas mediante proceso manual de enriado (F.N.T.PME) y (F.T.PME)

respectivamente. En donde se observa que para las partículas de F.N.T.PME el pico de máxima difracción se encuentra a los 15° , así mismo se notan picos a los 22° , 24.5° , 30.1° y 38.3° , para las partículas sometidas al tratamiento químico F.T.PME el pico de difracción máxima se encuentra a los 30.1° , observándose picos de difracción a los 15° , 22.1° , 24.4° , 30.1° y 38.3° , en las mismas posiciones, indicando dentro de estos, los cuatro picos principales en la estructura de celulosa tipo I (Oudiani et al., 2011), (De Dios Naranjo et al., 2016).

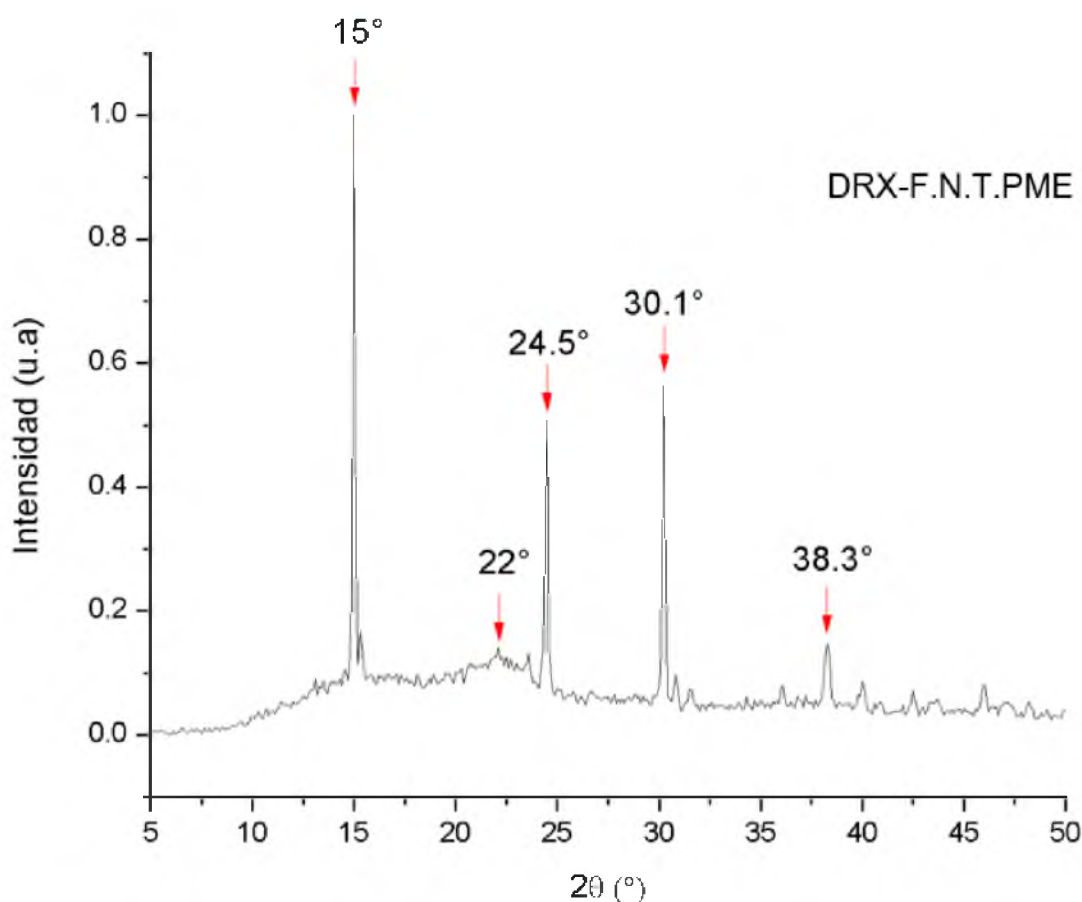


Figura 63.- Patrón de difracción de rayos x de partículas de fibra de *Agave angustifolia* Haw no tratadas (F.N.T) obtenidas por proceso manual de enriado.
Fuente propia.

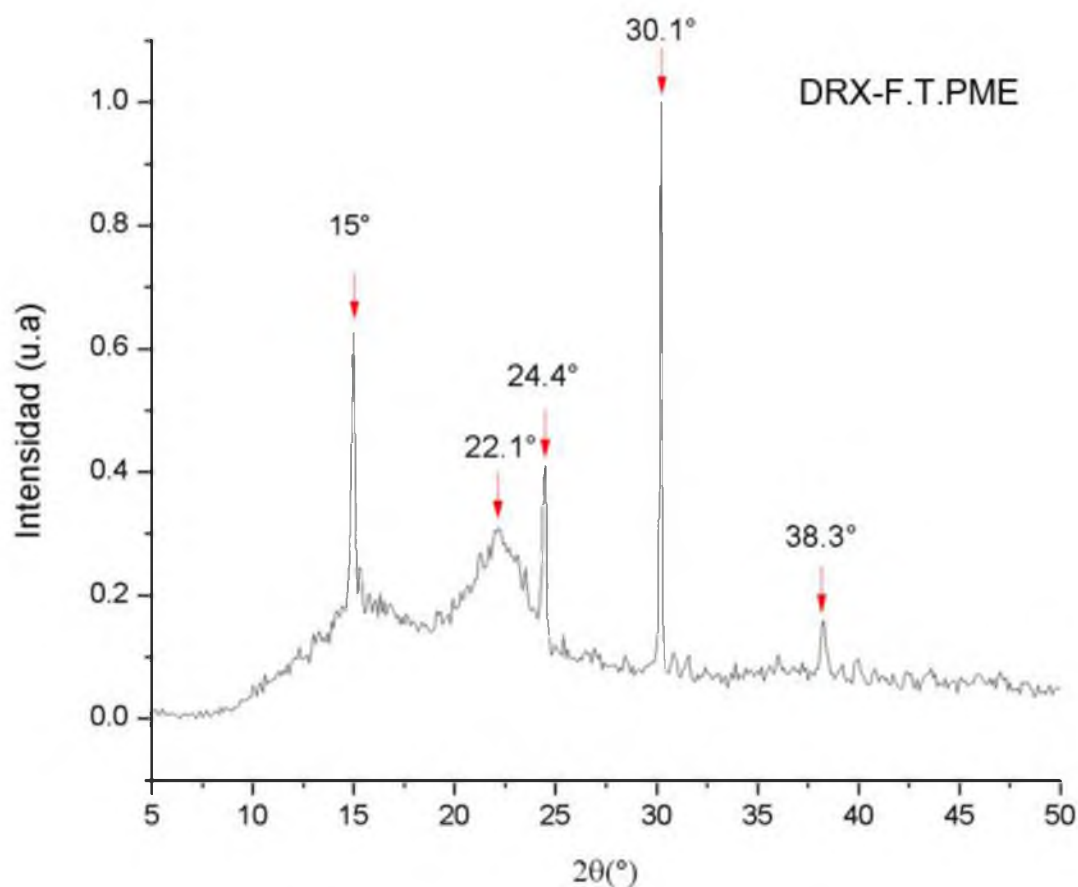
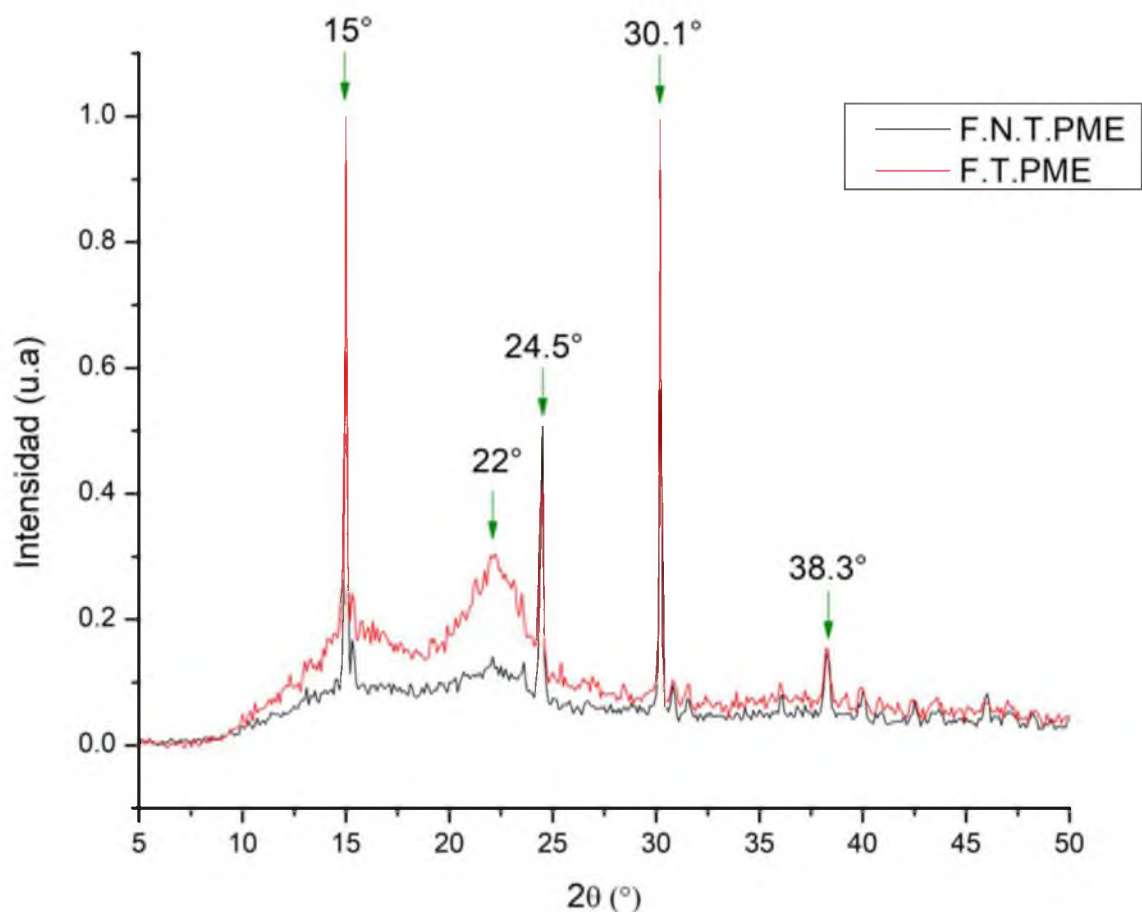


Figura 64.- Patrón de difracción de rayos x de la muestra de partículas de fibra de Agave angustifolia Haw tratadas (F. T), obtenidas mediante proceso manual de enriado. Fuente propia.

En la figura 65 se muestran ambos difractogramas super puestos en donde podemos observar un patrón similar para ambas muestras, ya que no existe un desplazamiento de las bandas cristalográficas en 2θ , sin embargo, si existe cambio en la posición del pico de difracción máxima y en la intensidad de los picos que representa cambios en el nivel de orden de las muestras. Podemos observar un cambio significativo en el pico a los 22° que corresponde a la fase mayoritaria cristalina de la celulosa, la cual reporta Wang et al. (2007) para la celulosa pura a 22.4° , el aumento en esta banda para las F.T.PME representa un incremento en la cristalinidad del material, lo que se demuestra con lo obtenido en De Jesús Angulo (2020) en dónde se registró un aumento en el índice de cristalinidad de las partículas de fibras sometidas al tratamiento químico respecto a las no tratadas de un 57.46% a 69.26%. Esto, relacionado a la eliminación del material no celulósico, por lo que se puede establecer que las partículas de F.T.PME son más cristalinas que las partículas de fibras iniciales F.N.T.PME.



*Figura 65.- Comparación de patrones de difracción de rayos x de las partículas de fibra de Agave angustifolia Haw extraídas mediante proceso manual de enriado, no tratadas y tratadas químicamente.
Fuente propia.*

Por otro lado, en la figura 66 se muestra la comparativa en los patrones de difracción de rayos x de las partículas de fibra extraídas a partir de un tratamiento mecánico, implementado en De Jesús Angulo (2020) y el proceso manual de enriado en este trabajo, se puede observar una clara diferencia en las intensidades y el estrechamiento de los picos principales y la diferencia de los picos a 24.4, 30.1, 34.5, y 38.3

Se observa principalmente el cambio en la forma y la intensidad de los primeros dos picos entre 15-16° y 22°, en ambas muestras de partículas de fibras tratadas y no tratadas, obtenidas por un proceso mecánico (F.T.PM y F.N.T.PM) respectivamente, se pueden observar estos dos picos con mayor anchura lo que en las muestras del proceso de obtención manual de enriado (F.T.P.ME y F.N.T.PME) se observan más estrechos, esto se puede atribuir al hecho de que las fibras que se obtienen de un proceso manual están sometidos a un proceso menos abrasivo por lo que al denotarse los picos más estrechos

y pronunciados se puede decir que se conservó mejor la forma y estructura de las fibras ya que los picos menos pronunciados se consideran celulosa de baja cristalinidad por lo que estas partículas en general contienen menor proporción de celulosa amorfa (De Dios Naranjo et al., 2016) a diferencia de las obtenidas mediante el proceso mecánico que además resultan ser fibras con un alto contenido de residuo seco adherido (Mayorga et al., 2004).

De lo que se puede concluir que las partículas de fibras de *Agave angustifolia* Haw obtenidas mediante proceso manual de enriado son más cristalinas que las obtenidas por el proceso mecánico, por lo que resulta en un material de refuerzo con mayor rigidez y repercute en la transmisión y mejora de propiedades mecánicas, al ser implementado como refuerzo en el procesado de un material compuesto.

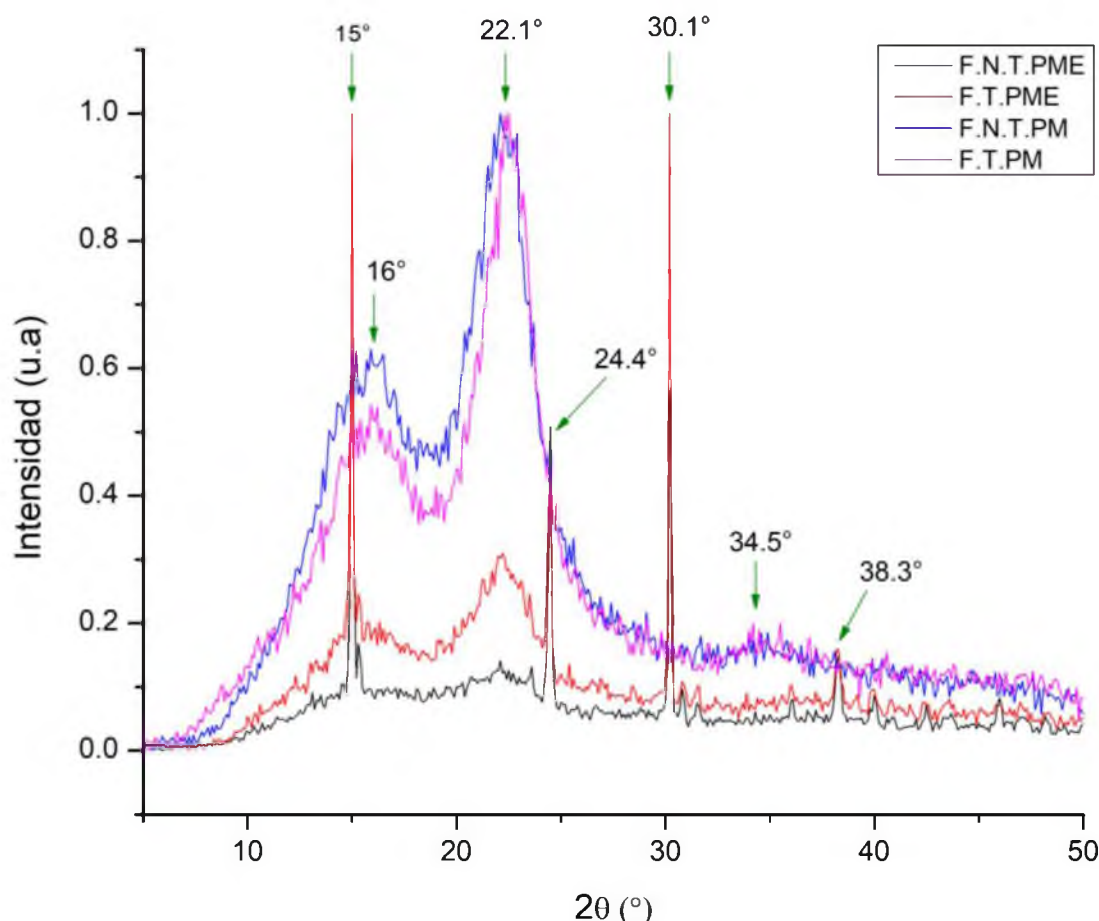


Figura 66.- Comparación de patrones de difracción de rayos x de partículas de fibras tratadas y no tratadas, obtenidas mediante proceso manual de enriado (F.T.PME y F.N.T.PME) y proceso mecánico (F.T.PM y F.N.T.PM) respectivamente.

Fuente propia.

4.3.2.- ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Los análisis de infrarrojo se llevaron a cabo para identificar los grupos funcionales presentes en las partículas de fibras de *Agave Angustifolia* Haw con y sin tratamiento alcalino y comprobar la eliminación de los grupos funcionales presentes en la lignina y la hemicelulosa.

En la figura 67 se puede observar los espectros de las partículas de fibra tratadas y no tratadas extraídas mediante el proceso manual de enriado (F.T.PME Y F.N.T.PME) respectivamente. Se identifica una banda característica amplia a los 3339 cm^{-1} entre los 3580 y 3100 cm^{-1} asociadas a la vibración de alargamiento del enlace de hidrógeno del grupo funcional O-H en las moléculas del agua y de la celulosa, se aprecia el incremento de este pico para las partículas de F.T.PME lo que puede demostrar según Victoria (2019) la extracción exitosa de la celulosa o bien implicar el contenido de humedad en las muestras (Elanthikkal et al., 2010), este pico se atribuye también a enlaces C-H que corresponden a grupos funcionales provenientes de ácidos y alcoholes grasos. Mientras tanto, las bandas entre 2973 y 2868 cm^{-1} se observan comunmente en muestras de biomasa lignocelulósica y corresponden a los grupos metil y metileno. Estas bandas y las correspondientes en 1456 , 1423 , 1369 y 1318 cm^{-1} son bandas de vibraciones correspondientes a la tensión del enlace H-C-H del grupo C-H₂ para la estructura de la celulosa (Contreras Q et al., 2010) (Elanthikkal et al., 2010).

El pico a los 1735 cm^{-1} entre 1750 - 1716 cm^{-1} se atribuye a la tensión del enlace C-O en C=O del residuo de grupos acetil y ésteres urónicos de la pectina, hemicelulosa o de los enlaces ésteres de los grupos carboxilo en los ácidos ferúlicos y p-cumaricos de la lignina y hemicelulosa (Sain & Panthapulakkal, 2006). La menor intensidad de este pico en la muestra de partículas F.T.PME indica la eliminación de la mayoría de las hemicelulosas y la lignina de las fibras mediante el proceso de extracción química aplicada con NaOH (Elanthikkal et al., 2010); (Sain & Panthapulakkal, 2006)(Bolío L. et al., 2011). Esto se comprueba con la disminución de la banda a 1232 cm^{-1} que corresponde a los enlaces C-O del grupo funcional presente en la lignina.

El pico observado en 1620 cm^{-1} entre $1660\text{--}1570\text{ cm}^{-1}$ se atribuye a las vibraciones de los anillos aromáticos de la lignina, la cuál es el componente principal que envuelve a la celulosa en las fibras de agave. En García-Méndez et al. (2020) se asocia esta banda con el agua absorbida en la celulosa cristalina, mencionada por Oudiani et al. (2009) como que la intensidad de este pico es proporcional a su contenido de celulosa presente en la composición química de las fibras vegetales.

Elanthikkal et al. (2010), menciona que los picos en la región entre $1200\text{--}950$ se deben al estiramiento del grupo C-O y la vibración del anillo de piranosa C-O-C lo que resulta en una banda prominente a los 1022 cm^{-1} para las fibras de banano, en este caso se observa el pronunciamiento de las bandas a 1155 cm^{-1} , 1050 y 1020 cm^{-1} , entre 1115 y 960 cm^{-1} los cuáles se resuelven después de la hidrólisis alcalina y en algunos casos el blanqueamiento y que se considera que la resolución más alta de estas bandas representa una mayor cristalinidad de la celulosa.

Las vibraciones oscilantes en la región de $700\text{--}900\text{ cm}^{-1}$ y la atribución de estas bandas para la celulosa pueden ser de carácter complejo (Zhbankov, 1966), en este sentido, la banda de absorción a 893 cm^{-1} es interesante de distinguir ya que se atribuye a la absorción más típica de la configuración estereoquímica β de las D-glucopiranosas, reportada para la celulosa natural como una banda débil, sin embargo su intensidad puede variar con el tratamiento al que se somete la celulosa (Bermello et al., 2008), como en el presente caso en el que el pico se observa con mayor intensidad para las partículas sometidas al tratamiento químico con NaOH.

En el intervalo de $700\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ se puede encontrar un pico atribuido a la presencia de un enlace glucósido β entre las unidades de glucosa en la celulosa, en este caso se observa a los 780 cm^{-1} .

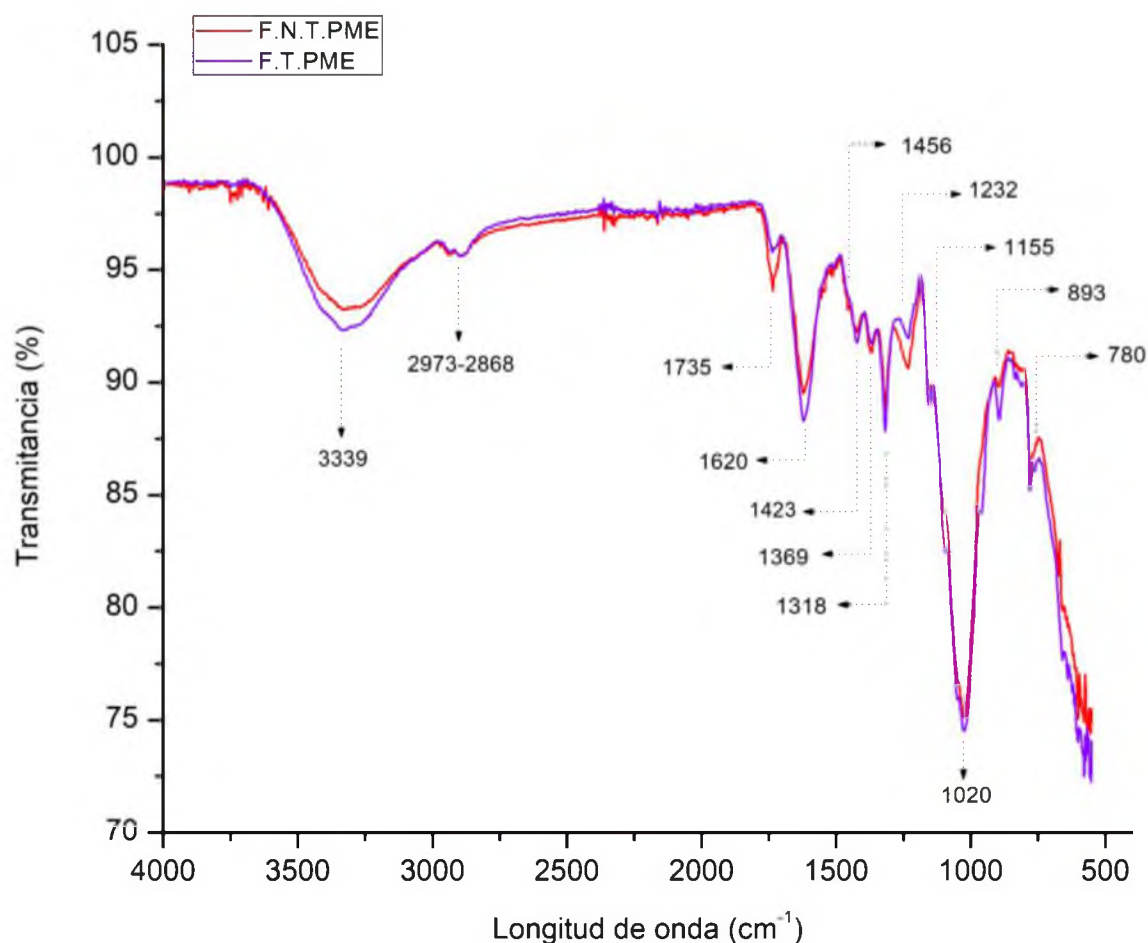


Figura 67.- Espectros FTIR de partículas de fibras de agave, tratadas y no tratadas, obtenidas mediante proceso manual de enriado (F.T.PME y F.N.T.PME) respectivamente.
Fuente propia.

En la comparación de las muestras de partículas tratadas y no tratadas, extraídas mediante proceso mecánico (F.T.PM y F.N.T.PM) y por el proceso manual de enriado (F.T.PME y F.N.T.PME) mostrado en las figuras 68 y 69 con la superposición de los espectros FTIR, se pueden percibir ciertas diferencias entre los picos principalmente a 1735 cm^{-1} el cuál se observa con menor intensidad en las muestras obtenidas mediante el proceso manual, con lo que se comprueba lo mencionado en Sain & Panthapulakkal (2006) en dónde la intensidad del pico disminuye en las fibras tratadas por el proceso de enriado microbiano, lo que se puede notar en este mismo caso con la disminución en la muestra de partículas F.T.PME en comparación con la F.N.T.PME y ambas muestras obtenidas por el proceso mecánico, lo que indica la eliminación en mayor proporción de extractos y hemicelulosas durante el enriado.

Así mismo el incremento de los picos entre 1020 cm^{-1} y 3339 cm^{-1} ambos pertenecientes a la estructura de la celulosa, con lo que se demuestra la extracción exitosa de esta en las muestras de partículas obtenidas en el presente trabajo.

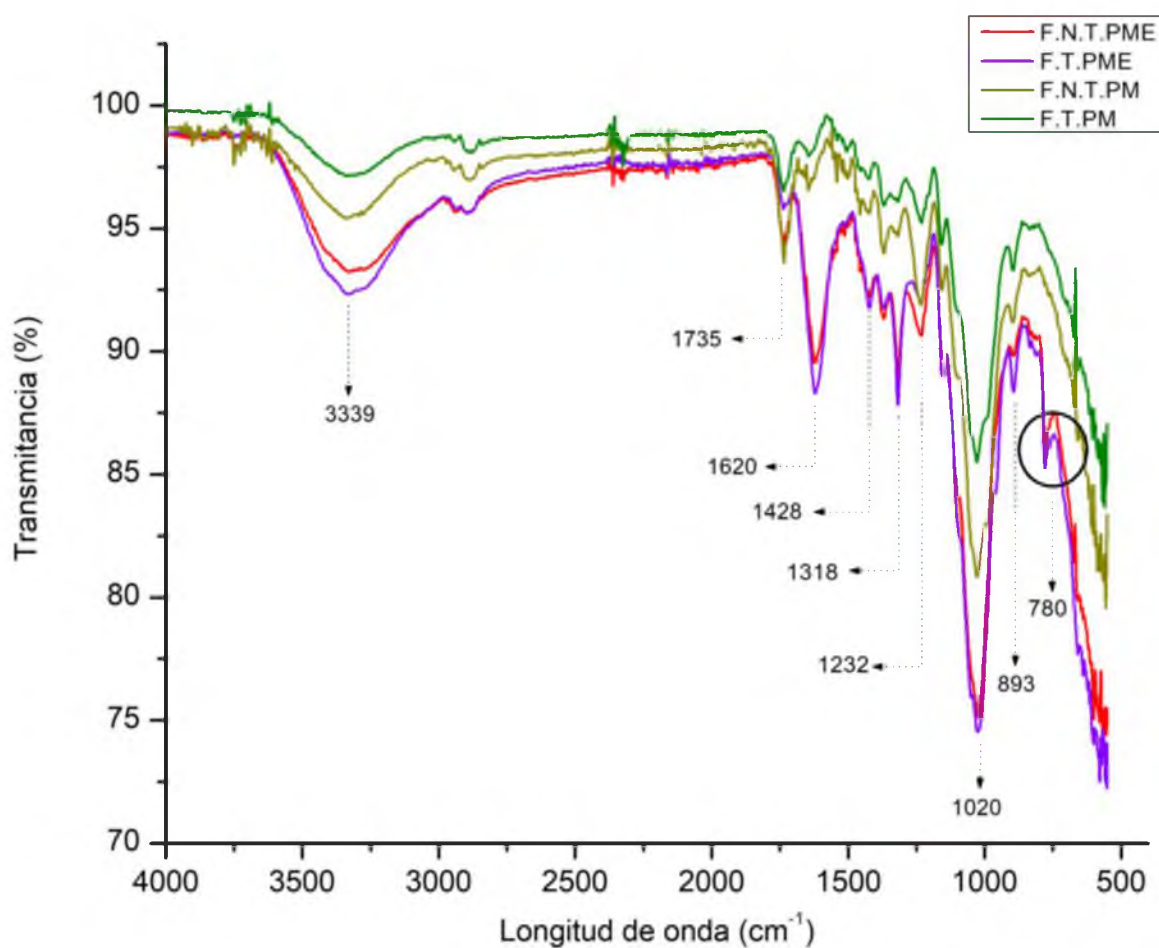
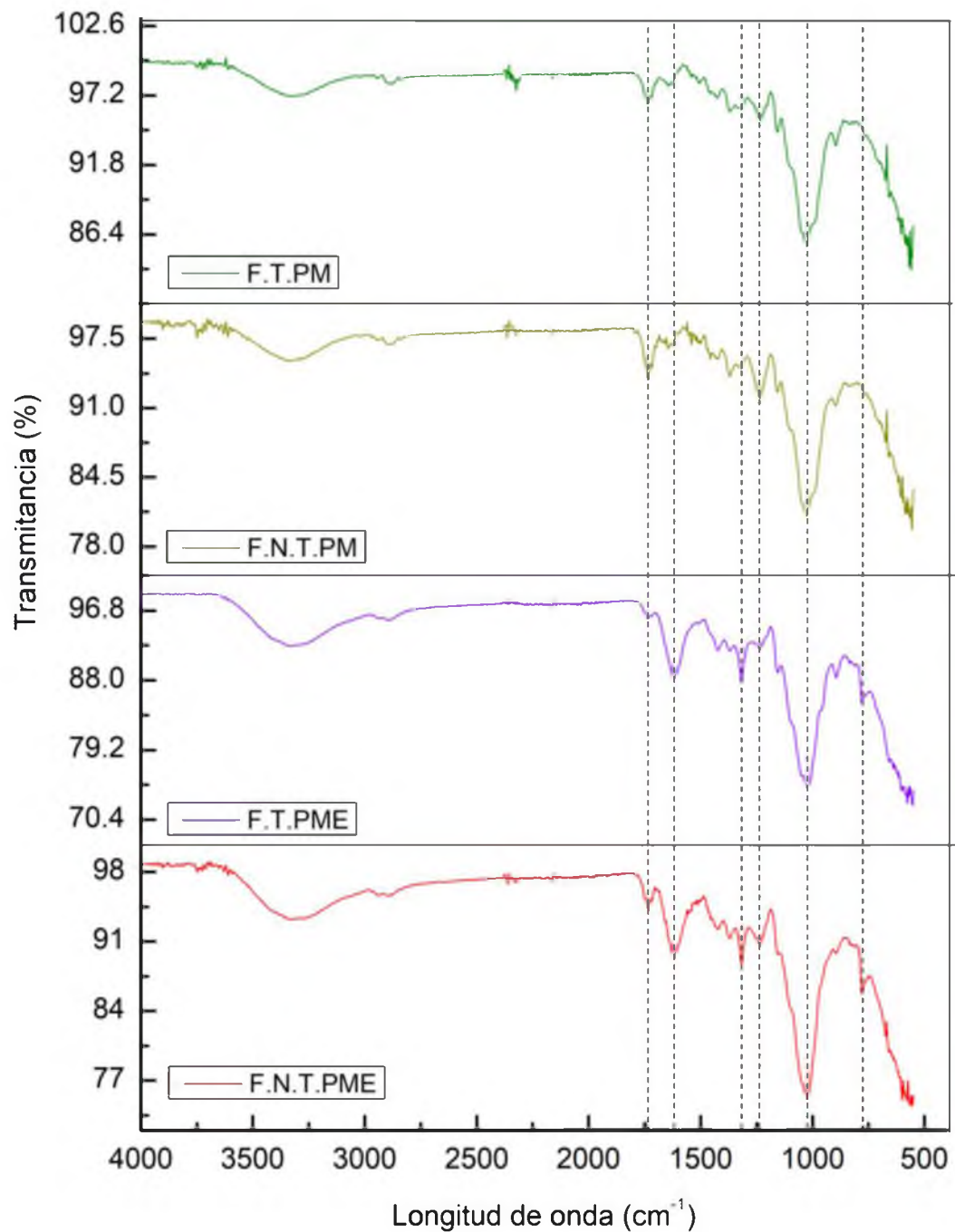


Figura 68.- Comparación de espectros FTIR superpuestos de partículas de fibra de agave no tratadas y tratadas químicamente, obtenidas mediante proceso manual de enriado y proceso mecánico, (F.N.T.PME, F.T.PME, y F.N.T.PM, F.T.PM) respectivamente.
Fuente propia.



*Figura 69.- Espectros FTIR de partículas de fibras de agave, tratadas y no tratadas, obtenidos mediante proceso mecánico y proceso manual de enriado (F.T.PM, F.N.T.PM y F.T.PME, F.N.T.PME) respectivamente.
Fuente propia.*

4.4.- OBTENCIÓN DEL FILAMENTO.

Para el desarrollo del proceso de obtención de los filamentos mediante el proceso de extrusión, se realizó una prueba piloto con el material puro PP bajo las condiciones reportadas en De Jesús Angulo (2020). Sin embargo, debido a las dificultades que se presentaron y a la observación de las propiedades físicas del material obtenido, se decidió realizar pruebas con una de las mezclas de PP + refuerzo (partículas de agave), con el fin de encontrar los parámetros óptimos para nuestro material.

Se realizaron cuatro pruebas con diferentes variables con el fin de analizar física y térmicamente sus características obtenidas para determinar las condiciones finales óptimas de procesamiento, para estos experimentos se tomaron muestras de la mezcla realizada con la concentración al 3%, es decir, 100 g de PP más 3 g de partículas de fibra tratada, la comparativa de las variables en cada muestra se presenta en la tabla 6, resaltando los parámetros variados en cada una.

Tabla 6.- Variación de parámetros en pruebas de extrusión de filamentos de material compuesto.

Variables	Nomenclatura	Temperatura zona de alimentación (°C)	Temperatura zona de plastificación (°C)	Temperatura zona de mezclado (°C)	Velocidad (RPM)	N° de ciclos de extrusión.
N° de prueba						
1	P1FT3	100	190	150	60	3
2	P2FT3	100	170	150	50	1
3	P3FT3	100	170	150	30	1
4	P4FT3	100	170	150	50	2

A continuación, se describen las observaciones durante el proceso de extrusión de cada prueba con la variación de parámetros.

Prueba 1

- La manipulación y el control del filamento a la salida del extrusor fue difícil ya que se rompía con facilidad y de manera frecuente.
- El color del filamento fue un color café oscuro intenso.
- Debido a que el material obtenido durante el primer ciclo de extrusión de esta prueba fue difícil de obtener y por recomendación del personal técnico con el fin

de obtener un material de mejor calidad y la mejor integración de matriz-refuerzo se realizaron dos ciclos más, sin embargo, el material final no mejoró físicamente, por el contrario, el filamento resultó con mayor porosidad.

- El control del filamento a la salida del extrusor mejoró con cada ciclo de extrusión.
- Se retiró el inicio y el final del filamento obtenido y se tomó solamente el tramo central.

Prueba 2.

- El material fluyó constantemente a la salida del extrusor por lo que su control fue más fácil que en la prueba 1.
- El filamento no se rompió con facilidad y fue con menor frecuencia al momento de jalarlo para hacerlo pasar por el sistema de enfriamiento y acumularlo.
- El color fue constante a lo largo del filamento.
- Físicamente, no se observó la presencia de porosidad en el material.
- Se tomó únicamente el tramo central del filamento total obtenido.

Prueba 3.

- Fue complicado mantener el filamento en la salida del extrusor debido a la velocidad con que el material fue extruido.
- El color del material tuvo un cambio drástico ya que alrededor de la mitad del filamento total de esta muestra tuvo un color café constante, en la zona central un color café claro y finalmente un café oscuro intenso, posiblemente debido al tiempo que la mezcla permaneció en el equipo, ya que, a mayor tiempo, mayor la probabilidad de degradación de las partículas de fibra.
- La visualización de las partículas a lo largo del filamento obtenido fue en mayor cantidad y en una tonalidad oscura, lo que refuerza el motivo anterior.
- Se tomó el tramo central del filamento obtenido.

Prueba 4.

Esta prueba se desarrolló en vista de las propiedades físicas que se pudo observar de los filamentos obtenidos en las tres pruebas anteriores, por lo que se decidió tomar los parámetros de referencia de la prueba 2, variando a dos ciclos de extrusión, ya que fue

en la que mejores resultados físicos del filamento se obtuvo y con la finalidad de mejorar la integración de matriz – partículas de fibra, al ser procesado y mezclado en dos ciclos.

- Mejoró el control y manejo del filamento a la salida del extrusor.
- El filamento no se rompió tan fácilmente y fue con menor frecuencia.
- El color se mantuvo constante a lo largo del filamento obtenido.
- Se tomó todo el filamento sin retirar el inicio ni el final, en ambos ciclos de extrusión.
- Finalmente, se pesó la cantidad de filamento del primer ciclo para observar que se recuperara la cantidad proporcional a la de la muestra inicial con la que se alimentó; la cantidad en peso obtenido inicial fue de 103 g de mezcla y se obtuvieron 102 g de filamento.

A continuación, en la figura 70 se muestran los espectros FTIR super puestos de las pruebas del proceso de extrusión, se realiza la comparación y se toma de referencia una muestra del material puro (PP-100) extruido con los parámetros de la P2FT3 especificados en la tabla 6, cabe mencionar que para un mejor análisis se corrieron por triplicado para cada muestra, finalmente al observar el cambio mínimo en las intensidades de las bandas se tomaron gráficas promedio para la comparación final.

Se pueden identificar en los espectros, las bandas que identifican al polipropileno como el material de matriz, principalmente las bandas de estiramiento del CH_3 a 2918 cm^{-1} , los estiramientos del enlace CH entre 2877 y 1636 cm^{-1} y en 1455 cm^{-1} del grupo CH_2 y se observa que no existe anclaje químico ni cambio en la estructura del material puesto que no se percibe desplazamiento de las bandas y aunque predominan los picos que identifican al polipropileno, se puede notar la ausencia de uno de los picos más característicos de la celulosa a los 3339 cm^{-1} entre los 3580 y 3100 cm^{-1} , que pudimos observar en los espectros de las partículas analizadas anteriormente, esto se puede atribuir a la concentración del material reforzante que se usó en estas pruebas y a la eliminación de las moléculas de agua presentes en el material de refuerzo, el agua absorbida durante el tratamiento químico y el agua ligada.

Si bien los picos del PP predominan en todas las pruebas, se puede observar que en el caso de la prueba 1 (P1FT3) la intensidad de las bandas disminuyó considerablemente, además que no se denotan las bandas pertenecientes a la celulosa esto debido a la mayor degradación de las partículas durante esta prueba.

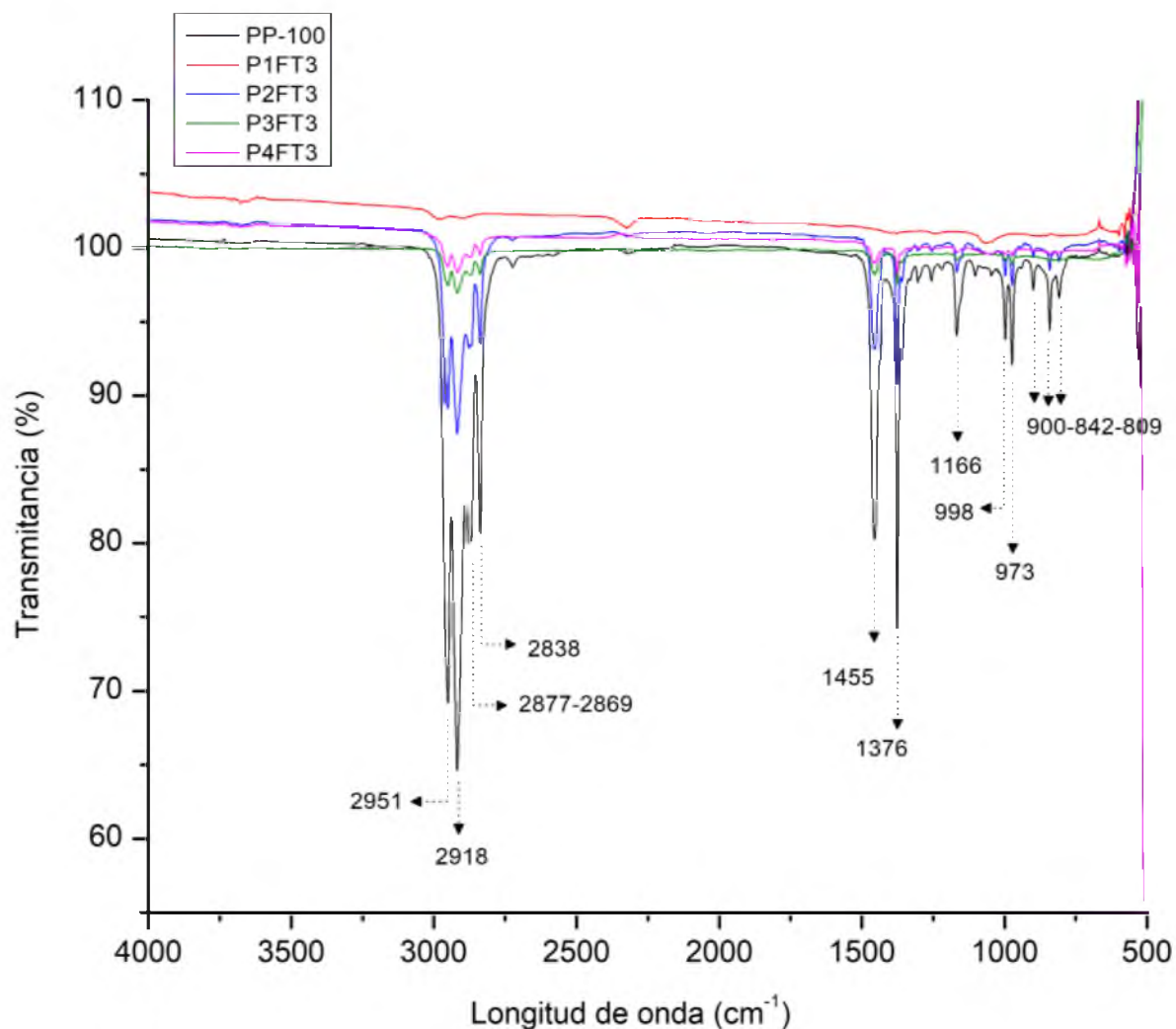
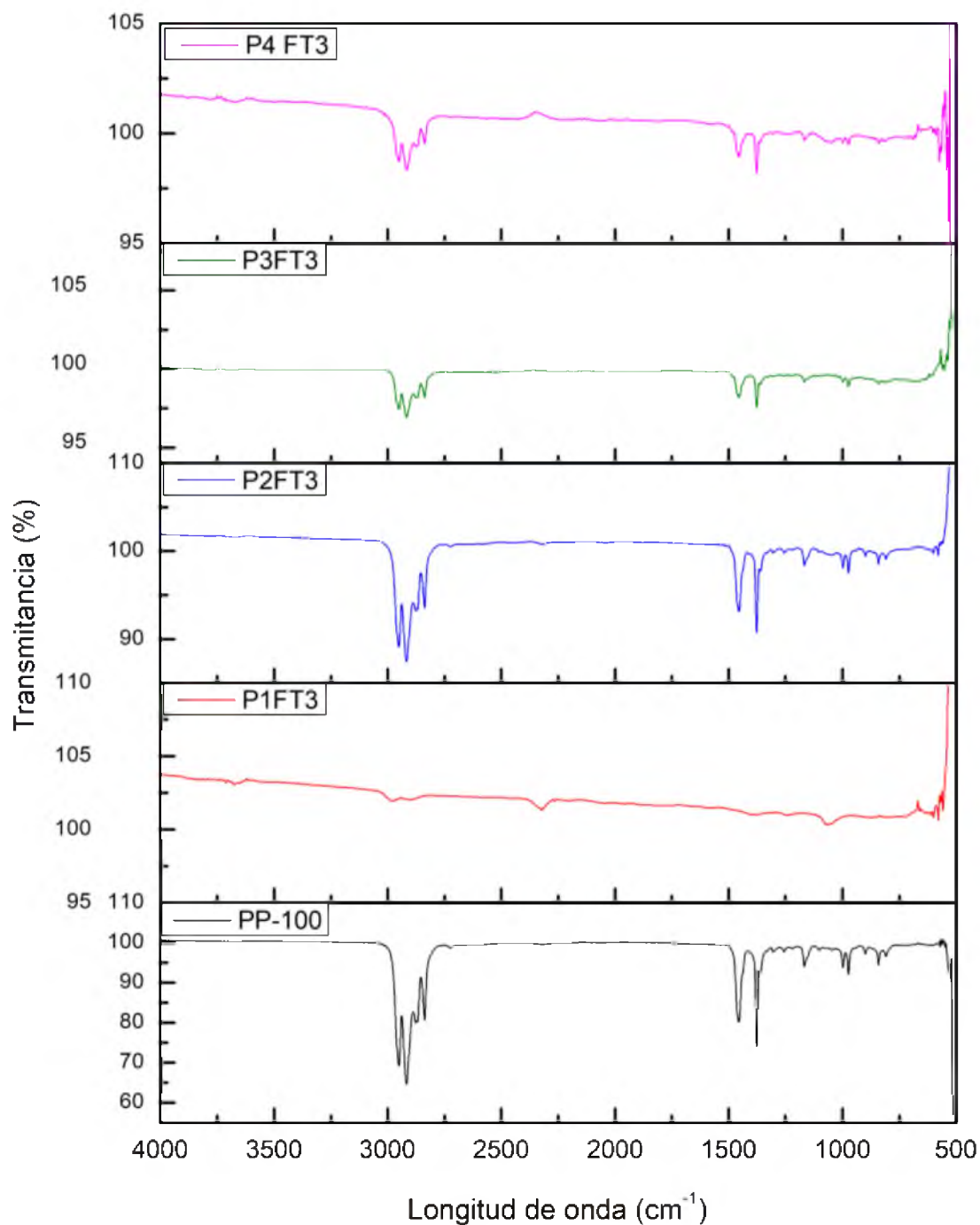


Figura 70.- Comparativa de espectros FTIR superpuestos del material compuesto en las pruebas de extrusión con la mezcla al 3% de concentración de partículas de fibra tratada, para la elección de parámetros finales a implementar.

Fuente propia.

En la figura 71 se observa la diferencia en la ausencia de las bandas de los espectros presentados.



*Figura 71.- Comparativa de espectros FTIR con mayor claridad, de la muestra sometida al proceso de extrusión con una contracción del 3% de partículas de fibra tratada, como prueba para la elección de parámetros.
Fuente propia.*

En conclusión, para el proceso de elección de los parámetros óptimos, se descartaron de acuerdo a la observación física de los filamentos y pellets obtenidos, así como las ventajas y desventajas durante el proceso de extrusión principalmente, reforzando con el análisis de los espectros FTIR de las muestras. Se descartó en primer lugar la velocidad de extrusión (RPM) debido a que en un rango mayor a los 60 RPM el control de los filamentos a la salida de la boquilla del extrusor se tornó bastante difícil y en un rango menor a partir de los 30 RPM se obtuvo un material con características físicas poco adecuadas, un material rugoso, poroso, de color intensificado debido a la posible degradación de las partículas de fibra por el tiempo sometido a las temperaturas de procesado y fácil de fracturar. La segunda variable a descartar fue la temperatura de la zona de plastificación ya que en esta sección se provoca un aumento en el nivel de cizalla sobre el material fundido lo que repercute en un mejor mezclado y finalmente el número de ciclos a extruir debido a que un proceso de 1 ciclo nos brindó un material físicamente aprovechable, sin embargo la distribución y mezclado de las partículas no fue el esperado por lo que se optó por aumentar los ciclos a 3, sin embargo, este aumento repercutió en un material poco óptimo debido principalmente a la porosidad y degradación del material que se confirma en los espectros anteriores en la P1FT3.

Finalmente, debido a las dificultades y mejorías observadas durante el proceso de extrusión de las cuatro pruebas, se determinó trabajar las muestras finales con los parámetros de la prueba 4 para la extrusión y obtención de los pellets de material compuesto finales.

En las figuras 72 a-b observamos los filamentos obtenidos del material compuesto reforzados con partículas de fibra no tratadas (F.N.T) y tratadas (F.T) respectivamente en las tres concentraciones reportadas en este trabajo, en dónde se hace notorio el cambio en las tonalidades del material de claro a más oscuro comenzando con la concentración más baja al 1.5%.3% y 5%.



Figura 72.- a-b- Filamentos de material compuesto con matriz de PP reforzado con partículas de fibra de *Agave angustifolia* Haw no tratadas (F.N.T) y tratadas químicamente (F.T).
Fuente propia.

4.5.- PELETIZACIÓN DE LOS FILAMENTOS

Durante el proceso de pelletización se pudo observar que los filamentos de material reforzado con fibras tratadas fueron más fáciles de procesar a diferencia de las reforzadas con partículas no tratadas, esto se puede atribuir de la observación física de los materiales a que las primeras se tornaban con mayor rigidez, por lo que no se atoraban en las cuchillas del equipo.

El rendimiento total del material obtenido fue de 2.938 kg de pellets de los 3.585 kg iniciales, distribuidos como se muestra en la tabla 7, por lo que se puede concluir que hubo una pérdida total del 18.32%.

En la figura 73 se muestran las siete muestras que fueron sometidas a estos procesos, nombrados anteriormente en la tabla 3 del apartado 3.8 y almacenados listos para su caracterización, en esta misma imagen se puede notar la diferencia en las tonalidades de claro a oscuro respecto a la concentración más baja a la más alta respectivamente.

Tabla 7.- Distribución de pesos del rendimiento total de pellets de material compuesto obtenidos.

Muestra	Concentración (%)	Pellets obtenidos (g)
M1: F.N.T-1.5	1.5	446
M2: F.N.T-3	3	463.8
M3: F.N.T-5	5	423.3
M4: PP-100	100	378.6
M5: F.N.T-1.5	1.5	398.1
M6: F.N.T-3	3	430.8
M7: F.N.T-5	5	387.4



*Figura 73.- Pellets de material compuesto de las siete concentraciones sometidas al proceso de extrusión y peletización.
Fuente propia.*

4.6.- CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LOS PELLETES

4.6.1.- ESPECTROSCOPIA INFRARROJA POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Se muestran a continuación los espectros FTIR superpuestos de los pellets de material compuesto obtenidos mediante el proceso de extrusión con las 3 diferentes concentraciones reportadas, en la figura 74 se hace la comparación de las muestras finales reforzadas con partículas de fibra no tratada (M1:F.N.T-1.5, M2:F.N.T-3 Y M3:F.N.T-5), tomando la referencia con el espectro perteneciente al PP puro como material de matriz (M4:PP-100) y al material reforzante, en este caso, la muestra analizada de partículas de fibra no tratadas obtenidas mediante proceso manual de enriado (F.N.T.PME), de la misma manera para las muestras reforzadas con partículas de fibra tratada (M5:F.T-1.5, M6:F.T-3 Y M7:F.T-5) comparadas con la M4:PP-100 y la muestra de material reforzante de partículas de fibra tratada obtenida mediante proceso manual de enriado (F.T.PME) (Figura 75).

Se pueden identificar predominantemente las bandas correspondientes al PP principalmente a 2918 cm^{-1} , 2836 cm^{-1} y 1376 cm^{-1} las bandas de estiramiento del CH_3 , los estiramientos del enlace del grupo CH_2 a 1455 cm^{-1} , del CH entre 2877 y 1637 cm^{-1} y

en 1166 cm^{-1} el estiramiento del grupo C-C (Victoria, 2019), además de los picos correspondientes a la celulosa principalmente alrededor de los 3580 y 3100 cm^{-1} , 1637 cm^{-1} y 1024 cm^{-1} . asociados a la cantidad de celulosa presente y la cantidad de agua absorbida por el material, así como a la presencia de material celulósico con mayor cristalinidad, sin embargo, la ausencia del pico entre 3580 y 3100 cm^{-1} , se atribuye a lo mencionado anteriormente con la eliminación de las moléculas de agua, el agua absorbida durante la extracción, el tratamiento químico y el agua ligada del material. Por lo que se puede referir a la obtención de pellets de un material compuesto mayormente cristalino.

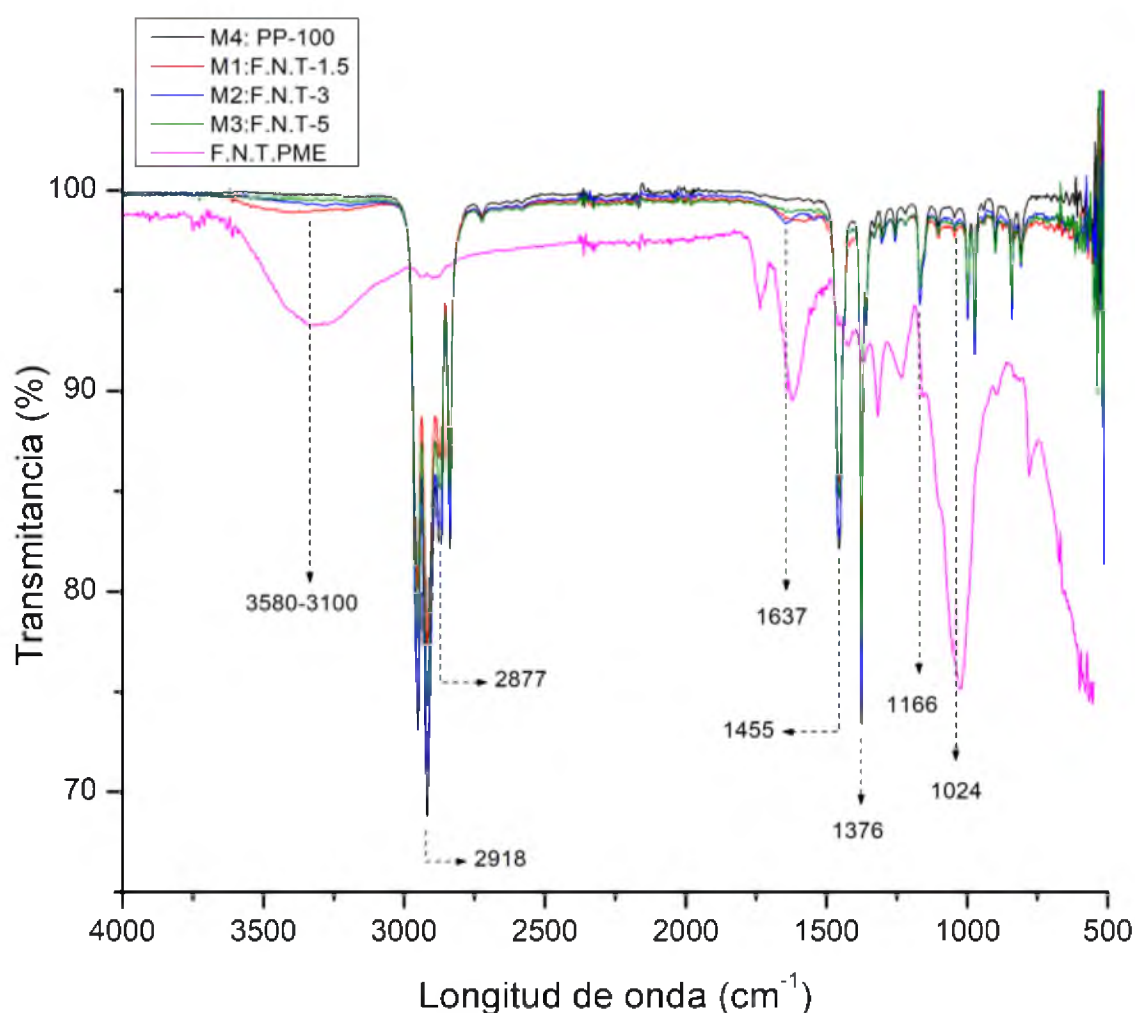


Figura 74.- Comparativa de espectros de pellets de material compuesto reforzado con partículas de fibra no tratada, en concentraciones de 1.5,3 y 5%.

Fuente propia.

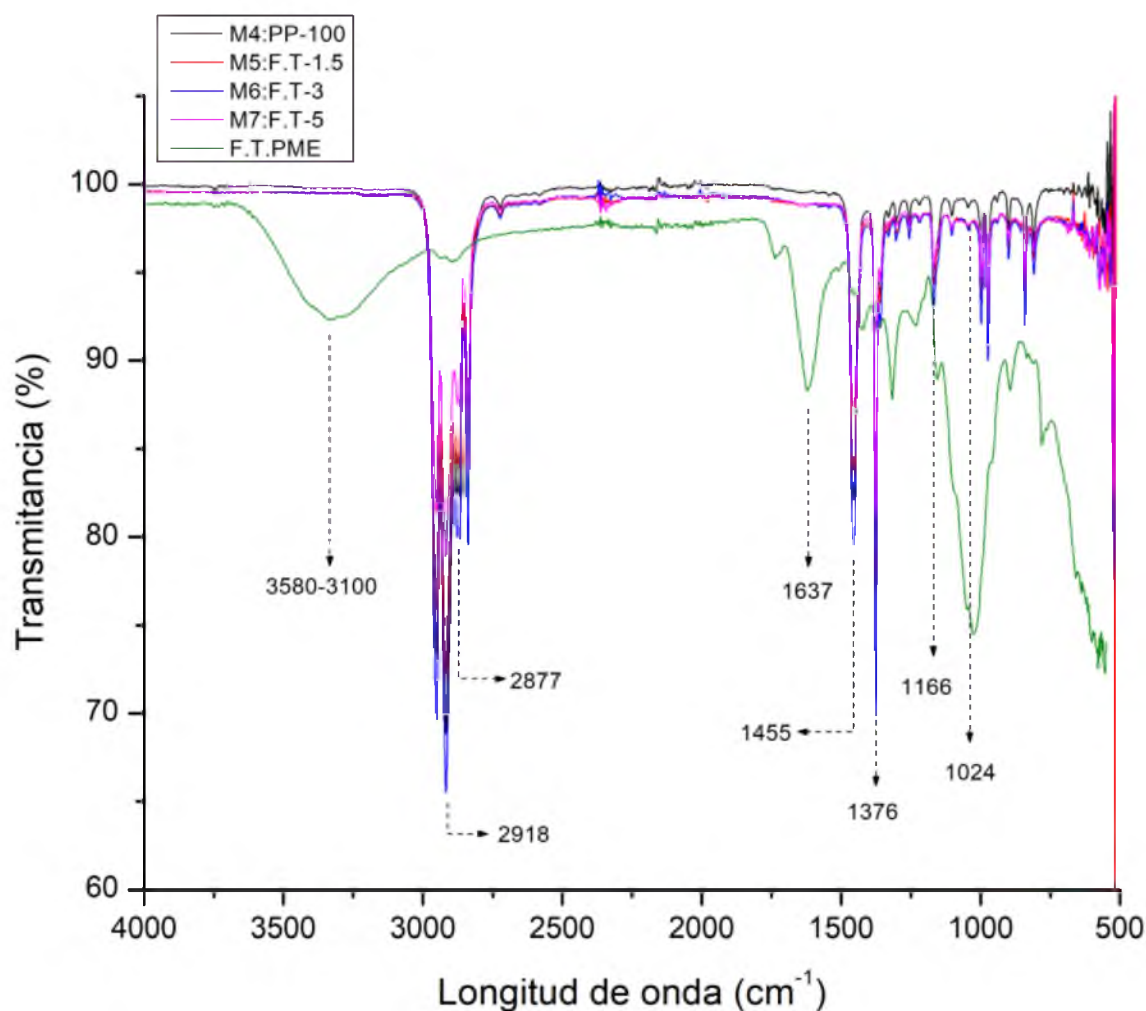


Figura 75.- Comparativa de espectros de pellets de material compuesto reforzados con partículas de fibra tratada en concentraciones de 1.5, 3 y 5%.
Fuente propia.

4.6.2.- CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

En la tabla 8, figuras 76 y 77 se muestran los termogramas de las pruebas DSC de los materiales compuesto reforzado con partículas de F.T y F.N.T con diferentes concentraciones, así como del polipropileno puro y se identifican propiedades térmicas del compuesto presentadas en las siete muestras.

En la tabla 8 se indican los resultados obtenidos del análisis como la temperatura de fusión (T_m), entalpía de fusión (H_m), temperatura de cristalización (T_c) y entalpía de cristalización (H_m).

Tabla 8.- Tabla de resultados de propiedades térmicas de los pellets de material compuesto, por calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Muestra	T_m °C	H_m J/g	T_c °C	H_c J/g
M1: F.N.T-1.5	167.51	104.	121.76	108.48
M2: F.N.T-3	167.15	99.829	122.02	104.25
M3: F.N.T-5	167.36	101.90	121.13	106.73
M4: PP-100	166.21	90.931	117.51	94.510
M5: F.T-1.5	167.65	105.42	122.14	109.60
M6: F.T-3	167.68	94.366	122.29	98.387
M7: F.T-5	168.74	100.27	120.92	105.27

En la figura 76 se presenta el termograma correspondiente a la identificación del punto de fusión de cada muestra, de donde, con los datos de la tabla 8 se concluye que la variación existente en la T_m de los compuestos reforzados con fibras de agave, superan ligeramente la T_m del material de matriz PP (M4:PP-100) que resultó en 166.21°C, aproximado al reportado en la ficha técnica del PP por el fabricante a 160°C, se puede percibir que el aumento de la temperatura y el desplazamiento de la curva ocurre a mayor concentración de partículas de fibra, específicamente de la tratada en el compuesto, ya que se observa que la temperatura mayor de 168°C se obtiene en la M7: F.T-5, reforzado con 5% de partícula de F.T. Se destaca también el aumento de H_m para todas las muestras, observando un patrón similar para ambas entalpías.

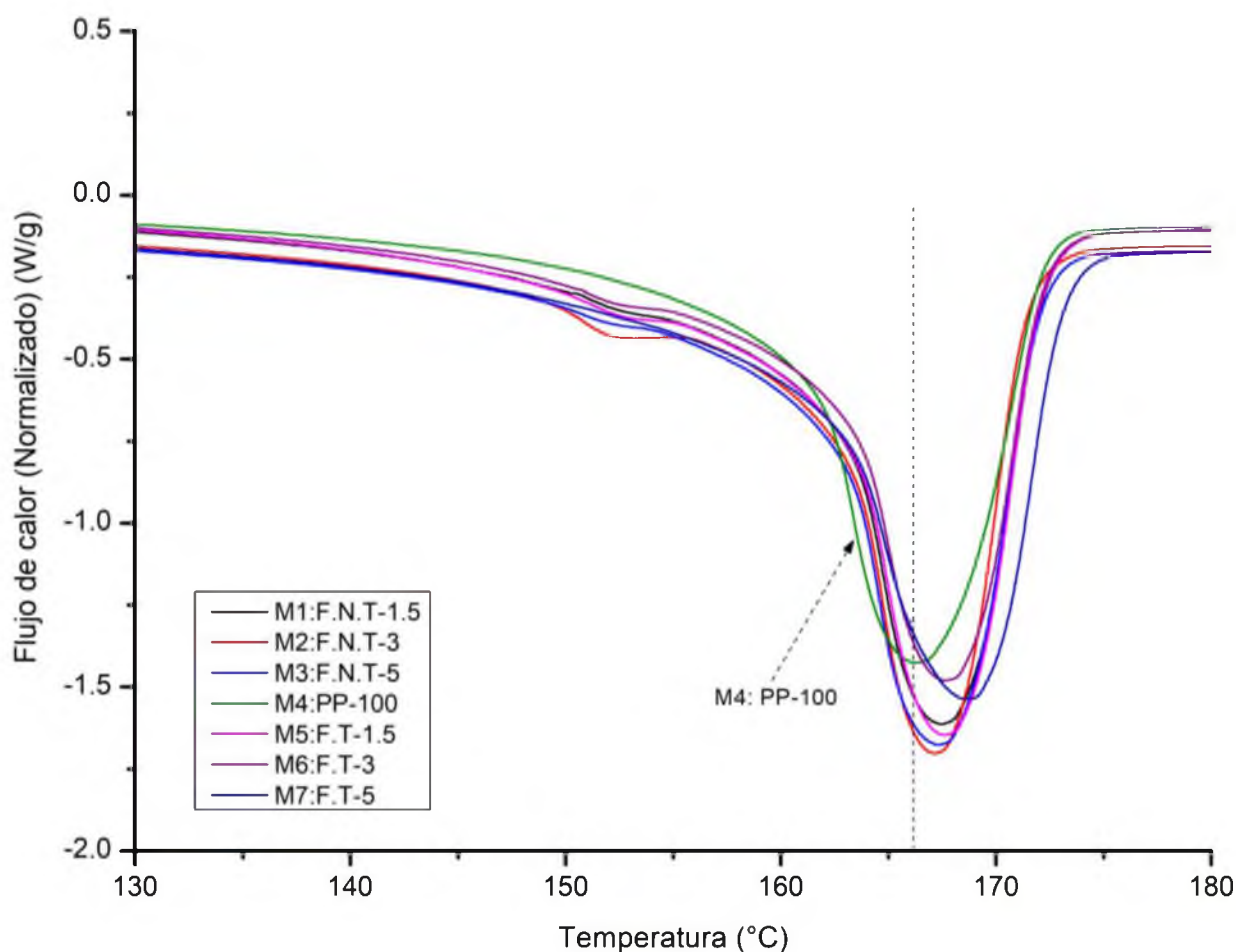


Figura 76.- Termograma DSC de pellets de material compuesto reforzados con partículas de fibras de *Agave angustifolia* Haw, tratadas y no tratadas - zona de fusión.

Fuente propia.

Por otro lado, en la figura 77 se puede apreciar el termograma correspondiente al punto de cristalización de los compuestos en comparación con el PP (M4: PP-100), en dónde se contempla un cambio significativo en el incremento de la T_c para todos los compuestos como se registra en la tabla 8, dado que la M4:PP-100 presenta una T_c de 117.51 °C y el resto de los compuestos muestran temperaturas de cristalización mayores, se observa que los reforzados con mayor concentración de partículas (5%) tanto de fibra tratada y no tratada son los de menor incremento con una T_c de 120.92°C y 121.13 °C respectivamente, mientras que la mayor temperatura de cristalización se alcanzó para la M6:F.T-3 a 122.29°C, es decir, el compuesto reforzado con 3% de partículas de fibra

tratada. Se observa, además, el incremento en la H_c para todos los compuestos con respecto al PP.

Lo anterior, parece indicar una buena compatibilidad en las interfaces de matriz - refuerzo, por lo que se puede referir a la obtención de un material compuesto que requiere de mayor energía para fundirse, lo que representa una mejora positiva en las propiedades térmicas del material.

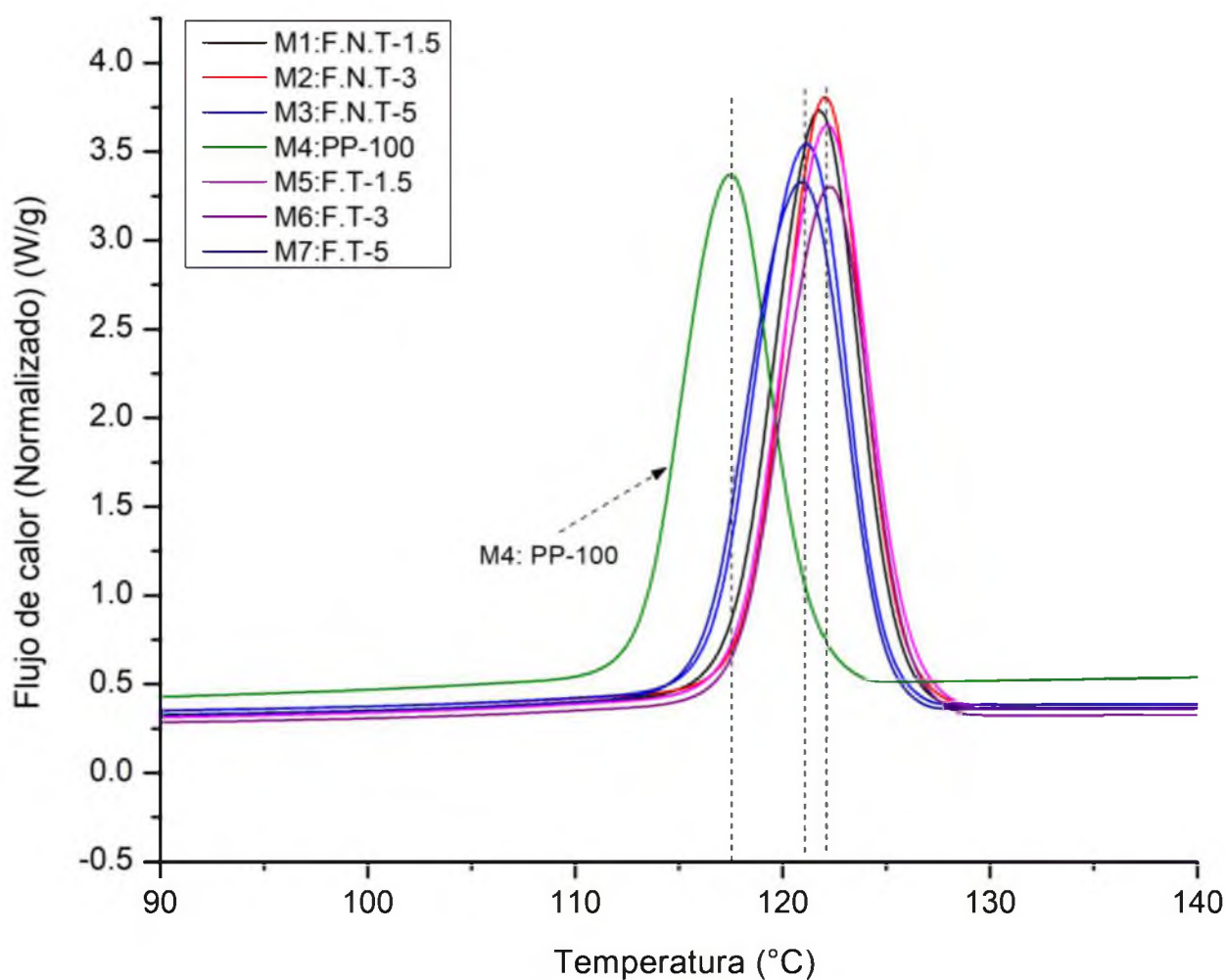


Figura 77.- Termograma DSC de pellets de material compuesto reforzado con partículas de fibras de *Agave angustifolia* Haw tratadas y no tratadas - zona de cristalización.
Fuente propia.

A partir de los datos anteriores se puede indicar que la adición de las partículas de fibras de *agave Angustifolia* Haw extraídas mediante un proceso manual de enriado repercuten en la mejora de las propiedades térmicas del compuesto obtenido, de manera específica, los reforzados con partículas sometidas al tratamiento químico, por lo que se puede concluir de este análisis, que los pellets del compuesto mejoraron sus propiedades térmicas con respecto al PP usado como matriz en este proyecto, lo que a su vez influye en un material con mayor cristalinidad, lo que se refuerza con los resultados de los análisis realizados anteriormente, por lo que se espera que esta mejora se vea reflejado también en las propiedades mecánicas del material, como la resistencia a la tracción. Finalmente, el uso de partículas de fibra tratada en una concentración del 3% resultó en la mejor opción, aunque la variación respecto a la concentración mayor no afecta demasiado a las propiedades térmicas.

CONCLUSIONES

- De la caracterización física de las fibras se obtuvo que existe una variabilidad considerable en la longitud de estas, en un promedio de 54.3 ± 5.1 cm, encontrándose la mayoría en un intervalo de 49.2 a 59.4cm, lo que se debe a la posición de las hojas del maguey que fueron tomados y al proceso de extracción.
- De acuerdo al proceso de tamizado de las partículas se obtuvieron cuatro tamaños en un rango de 300 μm hasta menores a 75 μm , de donde finalmente, se puede concluir que las mezclas de material compuesto se conformaron en su mayoría por partículas de fibra entre los 150 μm a menores de 75 μm , con mayor seguridad y en mayor porcentaje para el material reforzado con partículas sometidas al tratamiento químico (F.T), esto gracias a que su pulverización fue más práctica debido a la rigidez de las mismas por lo que se consiguió un pulverizado más homogéneo, producto de la acción positiva del tratamiento alcalino.
- Del tratamiento alcalino al que se sometieron las fibras, se concluye que generó una remoción de materia orgánica no celulósica que cubría a las fibras, esto se pudo comprobar con los espectros analizados en el FTIR.
- De acuerdo a los resultados obtenidos de la difracción de rayos X (DRX) tanto para las partículas tratadas y no tratadas, se identificaron picos cristalinos similares en 2θ correspondientes a la celulosa tipo I y aunque no existió desplazamiento de los picos para ambas muestras, si surgieron cambios en la intensidad de los mismos, así como la identificación del pico de difracción máxima. El cambio más importante notado en este análisis fue un incremento en el pico a 22.4° perteneciente a la fase mayoritaria cristalina de la celulosa, de acuerdo a la literatura, por lo que el aumento de este pico para las partículas de fibra tratadas obtenidas por proceso manual de enriado (F.T.PME) representa también un aumento en la cristalinidad del material, por lo que resultan con mayor rigidez que las partículas sin tratamiento.
- Con la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) de las partículas de fibra de agave obtenidas mediante proceso manual de enriado, se comprueba la obtención de estas con mayor proporción de celulosa pura, gracias

a la remoción de hemicelulosas, lignina y residuos orgánicos y se refuerza el aumento en la cristalinidad de las mismas debido al pronunciamiento de las bandas correspondientes para las partículas de fibra tratadas en comparación con las fibras no tratadas comparadas también, con las partículas de fibras extraídas por un proceso mecánico.

- Para el proceso de extrusión de los filamentos, se realizaron cuatro pruebas piloto con variación de parámetros en cuanto a temperaturas, velocidad (RPM) y número de ciclos, que se variaron de acuerdo a las dificultades, ventajas y desventajas durante el procesado y a la recomendación del personal técnico del laboratorio.
- De las pruebas piloto se obtuvieron cuatro muestras con diferentes propiedades físicas principalmente, las cuáles se sometieron a análisis FTIR, de dónde se observó que no existió modificación en la estructura de los pellets, sin embargo, se percibió la ausencia de ciertas bandas correspondientes a la cantidad de agua absorbida y ligada del material, con lo que se concluye en un material con una buena adherencia matriz- refuerzo, así mismo, la ausencia de bandas en la Prueba 1 (P1FT3) debido a la posible degradación del material reforzante.
- En el análisis de parámetros de extrusión se optó por trabajar bajo las siguientes condiciones: dos ciclos de extrusión, Temperatura Zona de alimentación 100°C, Temperatura Zona de plastificación 170°C, Temperatura Zona de mezclado 150 °C, con una velocidad de 50 RPM. Se obtuvieron filamentos de material compuesto en concentraciones de 1.5, 3 y 5 % de polipropileno reforzado con partículas de fibras tratadas y no tratadas, así como del material puro (PP).
- Del proceso de pelletización se observó la diferencia en cuanto a la rigidez de los filamentos de material compuesto, siendo los reforzados con F.T, los más fáciles de procesar debido a esta característica. Se llevó a cabo el peletizado a una velocidad en un rango de 25 – 40 RPM y se obtuvo un rendimiento total de 2.938 kg de pellets de los 3.585 kg de mezcla iniciales, representando una pérdida total de 18.32%.
- De acuerdo a la caracterización de los pellets obtenidos, del análisis FTIR se observó que no existe alteración química en la estructura del compuesto, sin embargo, se logró la reducción del contenido de agua absorbida y ligada en el material, lo que repercute en un compuesto con mayor compactación.

- Del análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) se obtuvo que el comportamiento de fusión de los materiales no se modifica en gran medida ya que la variación observada es muy baja, sin embargo, el material compuesto presenta propiedades térmicas mejoradas como la temperatura de cristalización, con respecto al PP, resultando en un aumento de 117.51°C a 122.29 °C para el compuesto reforzado con 3% de partículas de fibra de agave tratadas. Así mismo, resultó en un aumento tanto para H_m y H_c .
- Finalmente, se obtuvieron resultados favorables dado que el material de refuerzo resultó con propiedades aptas para su implementación en la obtención de los pellets del material compuesto, por lo que se concluye que los pellets del compuesto obtenido a partir de una matriz de polipropileno reforzado con partículas de fibra de *Agave angustifolia* Haw ha resultado ser un material con propiedades térmicas mejoradas con respecto al PP puro, esto en términos de cristalinidad, temperatura de cristalización y la eliminación de las moléculas de agua absorbidas, por lo que se puede mencionar que es un material idóneo para ser implementado en un segundo proceso de termoformado como la inyección

RECOMENDACIONES

De acuerdo a los alcances obtenidos durante el desarrollo de este trabajo, así como a las complicaciones presentadas, se recomienda:

- Elaborar el material con mezclas de diferentes tamaños de partícula.
- Determinar las propiedades químicas de las partículas de fibra.
- Determinar las propiedades mecánicas de las partículas de fibra.
- Considerar diferentes porcentajes para el tratamiento alcalino de las fibras.
- Considerar el uso de compatibilizantes para la elaboración del material compuesto.
- Experimentar el proceso de extrusión con diferentes variaciones de parámetros.
- Realizar la caracterización mecánica del material compuesto.
- Someter los pellets del material compuesto a un segundo proceso de termoformado como la inyección (elaboración de probetas).

BIBLIOGRAFÍA

- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wriqth, W. J. (1963). Ciencia e ingeniería de los materiales. In *Zeitschrift fur Naturforschung - Section B Journal of Chemical Sciences* (Vol. 18, Issue 9). <https://doi.org/10.1515/znb-1963-0911>.
- Beer, F., Johnston, E. R., DeWolf, J., & Mazurek, D. (2012). *mecánica de materiales* (Sexta Edic).
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de Polímeros*. Universidad de Alicante.
- Bermello, A., Díaz, D., Martínez, R., Quintana, G., Mieres, G., & Leal, J. A. (2008). Estudio de un material compuesto de partículas de bagazo de caña y matriz de polietileno mediante espectrometría FTIR. *Instituto Cubano de Investigaciones de Los Derivados de La Caña de Azúcar, XLII*(1–3), 106–111.
- Berumen Barbosa, M. E. (2009). Oaxaca: La actividad productiva Maguey-Mezcal. *Historia*.
- Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24, 221–274. http://ac.els-cdn.com/S0079670098000185/1-s2.0-S0079670098000185-main.pdf?_tid=af34542c-0260-11e7-a49c-00000aab0f27&acdnat=1488800173_c95596c7ddcc4673fe88c8ec84262bb9
- Bodros, E., & Baley, C. (2008). Study of the tensile properties of stinging nettle fibres (*Urtica dioica*). *Materials Letters*, 62(14), 2143–2145. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.11.034>
- Bolio L., G. ., Valadez G., A., Veleza, L., & A, A. (2011). Whiskers de celulosa a partir de residuos agroindustriales de banano; Obtención y caracterización. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(3), 505–511.
- Brown, A., Serantes, M., Álvarez, A., Matellanes, L., Momeñe, E., Txarroalde, J. R., Leal, J. A., & Renté, A. (2006). *Desarrollo de nuevos composites termoplásticos a partir de fibra de bagazo ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar. XL, Num 3*, 29–34.
- Bujjibabu, G., Chittaranjan Das, V., Ramakrishna, M., & Nagarjuna, K. (2017). Mechanical

- and Water Absorption Behavior of Natural Fibers Reinforced Polypropylene Hybrid Composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12249–12256.
- Caballero, M., Silva, L., López, I., José, A., Cortés, I., Montes, J., & García, R. (2008). Caracterización De Propiedades Mecánicas De Fibras Del *Agave Angustifolia* Haw. *14 Congreso Internacional Anual De La Somim*, 89–94.
- COMERCAM. (2022). *Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal A.C. Informe Estadístico 2022*.
- Contreras Q, H. J., Trujillo P, H. A., Arias O, G., Pérez C, J. L., & Delgado F, E. (2010). Espectroscopía ATR-FTIR de celulosa: Aspecto instrumental y tratamiento matemático de espectros. *E-Gnosis*, 8(0), 1–13.
- Cortés, C. I., & García, R. F. (2016). Morphology of the Bagasse Fibers Obtained from the Elaboration Process of Mezcal and Effects on Their Tensile Properties. *Journal of Natural Fibers*, 14(2), 250–261.
- (CRM), C. R. del M. (2020). El mezcal- La cultura líquida de México. Informe estadístico 2020. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952
- De Dios Naranjo, C., Alamilla-Beltrán, L., Gutiérrez-Lopez, G. F., Terres-Rojas, E., Solorza-Feria, J., Romero-Vargas, S., Yee-Madeira, H. T., Flores-Morales, A., & Mora-Escobedo, R. (2016). Aislamiento y caracterización de celulosas obtenidas de fibras de *Agave salmiana* aplicando dos métodos de extracción ácido-alcali. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(1), 31–43.
- De Jesús Angulo, J. L. (2020). “*Elaboración de un material compuesto para impresión 3d*.” Tesis de licenciatura. Universidad del Papaloapan.
- Dittenber, D. B., & Gangarao, H. V. S. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8), 1419–1429. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>
- Eguiarte, L. E., & González, A. (2007). *De genes y magueyes estudio y conservación de los recursos genéticos del tequila y el mezcal*.
- El Oudiani, A., Chaabouni, Y., Msahli, S., & Sakli, F. (2009). Physico-chemical

- characterisation and tensile mechanical properties of *Agave americana* L. fibres. *Journal of the Textile Institute*, 100(5), 430–439. <https://doi.org/10.1080/00405000701863350>
- Elanchezhian, C., Ramnath, B. V., Ramakrishnan, G., Rajendrakumar, M., Naveenkumar, V., & Saravanakumar, M. K. (2018). Review on mechanical properties of natural fiber composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1785–1790. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.276>
- Elanthikkal, S., Gopalakrishnapanicker, U., Varghese, S., & Guthrie, J. T. (2010). Cellulose microfibrils produced from banana plant wastes: Isolation and characterization. *Carbohydrate Polymers*, 80(3), 852–859. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.12.043>
- García, R. F., Cortés, C. I., & Almendárez, A. (2020). Thermochemical and Tensile Mechanical Properties of Fibers Mechanically Extracted from Leaves of *Agave angustifolia* Haw. *Journal of Natural Fibers*. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1840480>
- Hermida, É. (2011). *Polímeros*. Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
- Hidalgo, M., Caballero, M., Hernández, L. H., & Urriolagoitia, G. (2015). Chemical and morphological characterization of *Agave angustifolia* bagasse fibers. *Botanical Sciences*, 93(4), 807–817. <https://doi.org/10.17129/botsci.250>
- Kestur G., S., Arizaga, G. G. C., & Wypych, F. (2009). Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-An overview. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 34(9), 982–1021. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.12.002>
- Kestur G., S., Flores-Sahagun, T. H. S., Dos Santos, L. P., Dos Santos, J., Mazzaro, I., & Mikowski, A. (2013). Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 45, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.09.001>
- Martin, N., Mouret, N., Davies, P., & Baley, C. (2013). Influence of the degree of retting of flax fibers on the tensile properties of single fibers and short fiber/polypropylene composites. *Industrial Crops and Products*, 49, 755–767. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.06.012>

- Mayorga, E., Rössel, D., Ortiz, H., Quero, A. R., & Amante, A. (2004). Análisis comparativo en la calidad de fibra de Agave lecheguilla Torr., Procesada manual y mecánicamente. *Agrociencia*, 38(2), 219–225.
- Mechakra, H., Nour, A., Lecheb, S., & Chellil, A. (2015). Mechanical characterizations of composite material with short Alfa fibers reinforcement. *Composite Structures*, 124, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.01.010>
- Oudiani, A. El, Chaabouni, Y., Msahli, S., & Sakli, F. (2011). Crystal transition from cellulose I to cellulose II in NaOH treated Agave americana L. fibre. *Carbohydrate Polymers*, 86(3), 1221–1229. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.06.037>
- Ruiz Jiménez, A. (2016). “*Estudio mecánico de un composite adicionado con fibras de agave*”. *Tesis de licenciatura*. Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- Sain, M., & Panthapulakkal, S. (2006). Bioprocess preparation of wheat straw fibers and their characterization. *Industrial Crops and Products*, 23(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.01.006>
- Sallih, N., Lescher, P., & Bhattacharyya, D. (2014). Factorial study of material and process parameters on the mechanical properties of extruded kenaf fibre/polypropylene composite sheets. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 61, 91–107. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.02.014>
- Sanjuan, R. J., & Jasso, C. F. (2009). Efecto de la fibra de Agave de desecho en el reforzamiento de polipropileno virgen o reciclado. *Revista Mexicana de Ingeniera Química*, 8(3), 319–327.
- Silva, L., Hernández, L. H., Caballero, M., & López, I. (2009). Tensile Strength of Fibers Extracted from the Leaves of the angustifolia Haw Agave in Function of their Length. *Applied Mechanics and Materials*, 15, 103–108. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.15.103>
- Sugawara, E., & Nikaido, H. (2014). Properties of AdeABC and AdeIJK efflux systems of *Acinetobacter baumannii* compared with those of the AcrAB-TolC system of *Escherichia coli*. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 58(12), 7250–7257. <https://doi.org/10.1128/AAC.03728-14>

- Torres, B., & Centeno, D. (2014). *Elaboración y caracterización mecánica de un material compuesto en base a matriz termoplástico de ácido poliláctico (PLA) con refuerzo de fibras naturales*. Universidad católica de santa maría.
- Valea, A., Salas, P. ., Mondragón, I., & González, M. . (2005). Comportamiento frente a agresivos químicos del polipropileno reforzado con fibras naturales. *Actas Del Vi Congreso Nacional De Materiales Compuestos*, 73–80.
- Vargas R., B. (2014). *Análisis de compuestos reforzados con fibra natural de Agave en piezas moldeadas por inyección*. Tesis de grado. Centro de Investigación en Química Aplicada.
- Victoria, D. (2019). *Compósitos semi-sintéticos de plástico reciclado y nanofibra celulósica (Agave Fourcroydes)*. Tesis de grado. Instituto Tecnológico de CD, Madero. División de estudios de postgrado e investigación.
- Wang, B., Sain, M., & Oksman, K. (2007). Study of structural morphology of hemp fiber from the micro to the nanoscale. *Applied Composite Materials*, 14(2), 89–103. <https://doi.org/10.1007/s10443-006-9032-9>.
- Zhbankov, R. G. (1966). *Infrared spectra of cellulose and its derivatives*. Springer Science Business Media, LLC.