



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

**DESEMPEÑO FÍSICO-MECÁNICO DE UN
BIOCOMPUESTO DE MATRIZ EPÓXICA
REFORZADO CON FIBRA DE
Agave angustifolia Haw**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**



Presenta:

Jorge Colin Torres

DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

bajo la supervisión de:

Dr. Martin Hidalgo Reyes

"Enseñar la explotación de la tierra, no la del hombre"

Chapingo, Estado de México, diciembre de 2018



**DESEMPEÑO FÍSICO-MECÁNICO DE UN BIOCOMPUESTO DE MATRIZ
EPÓXICA REFORZADO CON FIBRA DE *Agave angustifolia* Haw**

Tesis realizada por **Jorge Colin Torres** bajo la supervisión del comité asesor
abajo mencionado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial
para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

DIRECTOR:



DR. MARTÍN HIDALGO REYES

CO-DIRECTOR:



DR. MARCOS MIGUEL GONZÁLEZ PEÑA

ASESOR:



DR. ARTEMIO PÉREZ LÓPEZ

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por haberme brindado el apoyo para la realización de mis estudios de maestría.

Al programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral de Agua (IAUIA) por brindarme las herramientas necesarias para reforzar mi formación académica y darme la oportunidad de pertenecer a su programa educativo.

Al departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola (DIMA) y a la División de Ciencias Forestales (DICIFO) por brindarme los equipos y personal necesario para la realización de este trabajo de tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca para la realización de mis estudios de maestría.

Al Dr. Martín Hidalgo Reyes por aceptar la dirección del presente proyecto y por sus atinados comentarios para mejorar siempre el trabajo de tesis.

Al Dr. Marcos Miguel Gonzáles Peña por su enorme ayuda económica y académica, por sus consejos y sugerencias para la realización del presente trabajo de tesis.

Al Dr. Artemio Pérez López por su valiosa contribución para la culminación del presente trabajo de tesis.

Al Dr. Jorge Ramón Robledo Ortiz por las facilidades brindadas para la realización de pruebas de impacto en las instalaciones del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI) de la Universidad de Guadalajara (UDG).

A la Dra. María del Rosario Venegas Ordoñez por el apoyo para la realización de las pruebas de tracción y de flexión.

DATOS BIOGRAFICOS

Jorge Colin Torres nació el 09 de mayo de 1989 en el municipio de Melchor Ocampo perteneciente al estado de Michoacán. Realizó sus estudios de primaria en la escuela Ignacio Zaragoza en el municipio de Temascalapa en el Estado de México. En el mismo municipio, cursó sus estudios de secundaria en la escuela Secundaria Técnica No. 134, Ignacio Manuel Altamirano. En 2007 es aceptado en la Universidad Autónoma Chapingo donde cursó sus estudios de nivel medio superior en la Preparatoria Agrícola. Realizó sus estudios de Licenciatura en el programa de Ingeniería Mecánica Agrícola, de donde egresó en el 2015.

En el año 2016 ingresó al programa de Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua en la Universidad Autónoma Chapingo, dentro de la especialidad de mecanización agrícola desarrolló y caracterizó un material biocompuesto reforzado con fibra de bagazo de agave para determinar sus posibles aplicaciones en industrias como la automotriz y la construcción, entre otras.

CONTENIDO GENERAL

CONTENIDO GENERAL	v
ÍNDICE DE CUADROS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1.- JUSTIFICACIÓN	4
1.2.- OBJETIVOS	5
1.2.1.- Objetivo general	5
1.2.2.- Objetivos específicos	5
1.3.- Organización de la tesis	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	7
2.1.- Fibras naturales	7
2.1.2.- Estructura de las fibras de origen vegetal	9
2.1.3.- Composición química de fibras vegetales	11
2.1.3.1.- Celulosa	11
2.1.3.2.- Hemicelulosa	12
2.1.3.3.- Lignina	13
2.1.3.4.- Materiales extractivos	14
2.1.4.- Propiedades físico-mecánicas de las fibras vegetales	15
2.1.5.- Aplicaciones de las fibras naturales	17
2.2.- Materiales compuestos	17
2.2.1.- Clasificación de materiales compuestos	18
2.2.1.1.- Biocompuestos de matriz termoestable	18
2.2.1.2.- Biocompuestos de matriz termoplástica	19

2.2.2.- Aplicación de biocompuestos reforzados con fibras de origen vegetal	20
2.2.3.- Mecanismos de adhesión.....	21
2.2.3.1.- Adhesión mecánica.....	22
2.2.3.2.- Teoría electrónica o electrostática	22
2.2.3.3.- Teoría de difusión	22
2.2.3.4.- Teoría de adsorción	23
2.2.3.5.- Teoría de enlace químico.....	23
2.3.- Procesos de fabricación de compuestos de matriz termoestable.....	25
2.3.1.- Sistemas abiertos.....	25
1.3.1.1.- Hand lay up (colocación manual).....	25
2.3.1. 2.- Spray up (atomización)	25
2.3.1.3.- Embobinado de filamentos.....	26
2.3.2.- Sistemas cerrados.....	26
2.3.2.1.- Moldeo por inyección	26
2.3.2.2.- Moldeo por extrusión.....	27
2.3.2.3.- Moldeo por compresión.....	27
2.3.2.4.- Pultrisión	27
2.3.2.5.- Moldeo por transferencia de resina (RTM).....	28
2.4.- Propiedades de compuestos reforzados con fibras de origen vegetal. ..	28
2.4.1.- Diagrama esfuerzo-deformación	29
2.4.2.- Esfuerzo	29
2.4.3.- Deformación unitaria	30
2.4.4.- Resistencia a la tensión	30
2.4.5.- Resistencia a la flexión.....	30
2.4.6.- Resistencia al impacto	31
2.4.7.- Módulo de elasticidad.....	31
2.5.- Literatura citada.....	33

CAPÍTULO 3. DESEMPEÑO FISICO-MECÁNICO DE UN BIOCOMPUESTO DE MATRIZ EPÓXICA REFORZADO CON FIBRA DE *Agave angustifolia*

Haw	40
3.2.- Introduccion	41
3.3.- Materiales y métodos	43
3.3.1.- Preparación de fibras	45
3.3.2.- Modificación de las fibras	46
3.3.2.1.- Tratamiento alcalino (NaOH)	46
3.3.2.2.- Tratamiento con silano	46
3.3.2.3.- Tratamiento con bicarbonato de sodio NaHCO_3	47
3.3.3.- Elaboración de los paneles del material compuesto	47
3.3.4.- Caracterización físico- mecánica del biocompuesto	48
3.3.5.- Análisis estadístico	49
3.4.- Resultados y discusión	50
3.4.1.- Acondicionamiento de las fibras	50
3.4.2.- Efecto del contenido y la longitud de fibra en las propiedades mecánicas del biocompuesto.	50
3.4.3.- Efecto del tratamiento químico en las propiedades mecánicas del biocompuesto.	54
3.4.3.1.- Propiedades de tracción	54
3.4.3.2.- Propiedades de flexión	55
3.4.3.3.- Resistencia al impacto	55
3.4.3.4.- Análisis de fractura mediante SEM	56
3.4.4. - Efecto del tratamiento químico en las propiedades físicas del biocompuesto.	58
3.4.4.1.- Dureza y densidad	58
3.4.4.2.- Contenido de humedad	59

3.3.4.3.- Efecto del contenido de humedad en las propiedades mecánicas del biocompuesto.	60
3.4.5.- Efecto de la hibridación en las propiedades de flexión del biocompuesto.	61
3.4.6.- Potenciales aplicaciones del material biocompuesto	63
3.5.- Conclusiones	65
3.6.- Literatura citada.....	67
ANEXOS	73
Preparación de fibras y equipo utilizado	73
Modificación de las fibras	77
Equipos utilizados para preparar probetas y realizar ensayos físico-mecánicos	78
Análisis de superficie de fractura	82

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 2

Cuadro 1. Fibras vegetales de importancia según su origen	8
Cuadro 2. Composición química de algunas fibras vegetales.....	15
Cuadro 3. Propiedades físico-mecánicas de fibras naturales de uso común...	16

CAPÍTULO 3

Cuadro 1. Propiedades físico-mecánicas del <i>A. angustifolia</i>	43
Cuadro 2. Ensayos realizados a los biocompuestos.....	49
Cuadro 3. Análisis multifactorial para los factores; longitud (A) contenido de fibras (B) para las variables RUT, MOT, MOR y MOF.	51
Cuadro 4. Comparación de medias de tratamientos mediante la prueba Tukey	52
Cuadro 5. Comparación de propiedades mecánicas de materiales aplicados en diferentes áreas	65

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. Estados productores de mezcal con denominación de origen..	3
---	---

CAPÍTULO 2

Figura 1. Clasificación de las fibras naturales	8
Figura 2. Estructura de una fibra lignocelulósica.....	10
Figura 3. Estructura de la molécula de la celulosa.....	12
Figura 4. Estructura de la hemicelulosa	13
Figura 5. Estructura de monolignoles de la lignina.....	14
Figura 6. Curva típica esfuerzo-deformación de un material.....	29

CAPÍTULO 3

Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento general de obtención y evaluación del desempeño del biocompuesto	44
Figura 2. Mallas: a) No. 10, b) No. 14, c) No. 20, y d) No. 30... ..	45
Figura 3. Esquema del mecanismo para la elaboración de paneles	47
Figura 4. Probetas tipo I para ensayos de tracción	48
Figura 5. Histogramas de longitudes de fibras de <i>A. angustifolia</i>	50
Figura 6. Resistencia mecánica de biocompuestos de resina epóxica reforzados con fibras de <i>A. angustifolia</i> : RUT, resistencia ultima a la tracción y MOR, resistencia a la flexión.	53
Figura 7. Módulo de elasticidad biocompuestos de resina epóxica reforzados con fibras de <i>A. angustifolia</i>	54

Figura 8. Efecto del tratamiento químico en la resistencia y módulo de tracción	55
Figura 9. Efecto del tratamiento químico en la resistencia y módulo de flexión	55
Figura 10. Efecto del tratamiento químico en la resistencia al impacto.....	56
Figura 11. Fractografías SEM; a) FST, b) FSIL, c) FMER y d) FBIC	57
Figura 12. Efecto del tratamiento químico en la dureza y densidad del biocompuesto.....	59
Figura 13. Efecto del tratamiento químico en la absorción de humedad del biocompuesto.....	60
Figura 14. Efecto del tratamiento químico en las propiedades mecánicas del biocompuesto después de la absorción de agua	61
Figura 15. Resistencia a la flexión de biocompuestos híbridos.....	62
Figura 16. Módulo de flexión de biocompuestos híbridos	63

ANEXOS

Figura 1. Recolección de fibras de agave	73
Figura 2. Lavado de fibras de agave	73
Figura 3. Secado de fibras de agave	74
Figura 4. Guillotina para cortar papel	74
Figura 5. Molino Wiley.....	75
Figura 6. Horno de laboratorio Quincy Lab	75
Figura 7. Tamiz vibratorio Fritsch.....	76
Figura 8. Agitador magnético VWR.....	77
Figura 9. Sistema de filtrado por vacío.....	78
Figura 10. Sierra radial OMGA 500.....	78
Figura 11. Ensayo de tracción.....	79
Figura 12. Ensayo de Flexión.....	79

Figura 13. Máquina de impacto CEAST 9050	80
Figura 14. Durómetro Mitutoyo ARK	80
Figura 15. Vernier digital INSIZE.....	81
Figura 16. Balanza de precisión OHASUS, Discovery.	81
Figura 17. Microscopio electrónico de barrido QUANTA 504.....	82
Figura 18. Recubridor de metal QOURON-Q150R ES	82

DESEMPEÑO FÍSICO-MECÁNICO DE UN BIOCOMPUESTO DE MATRIZ EPÓXICA
REFORZADO CON FIBRA DE *Agave angustifolia* Haw¹

Jorge Colin Torres²; Martin Hidalgo Reyes³

RESUMEN

En México, anualmente se generan cerca de 15.6 Mt de residuos agroindustriales entre los que destaca el bagazo de agave en la producción de bebidas espirituosas. Así, en 2017, se generaron cerca de 80 mil toneladas de bagazo derivados de la producción de 4 Mm³ de mezcal. En este estudio se desarrollaron biocompuestos de fibra corta de bagazo del *Agave angustifolia* Haw y se evaluó el desempeño físico-mecánico que presenta como refuerzo de una matriz de polímero epóxico de baja viscosidad en un biocompuesto laminar. Primero, se elaboraron paneles de 200x110x3.8 mm³, para probar 12 combinaciones con tres contenidos (18, 24 y 30%) y cuatro longitudes de fibra (1, 3 y 6 mm, y mezcla), y se compararon con los paneles de resina sin fibra. Se realizaron pruebas de tracción paralela y de flexión de tres puntos. Después de seleccionar la mejor combinación, se evaluó el efecto del pretratamiento químico con bicarbonato de sodio, silano, e hidróxido de sodio, en la interfaz fibra-matriz para incrementar la resistencia mecánica (tracción, flexión, impacto y dureza) antes y después de la absorción de agua. Mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) se observaron las superficies de fractura de las probetas ensayadas a impacto para conocer el efecto del tratamiento químico sobre las propiedades físico-mecánicas del material. Finalmente se evaluó el efecto que tiene la hibridación en la resistencia a la flexión. Los resultados obtenidos permiten observar una disminución de la resistencia mecánica (tracción, flexión) con la incorporación de fibras, sin embargo, el módulo de elasticidad aumenta en los dos modos de prueba. Los tratamientos químicos tienen un efecto positivo en la resistencia mecánica, sin embargo, tienden a disminuir el módulo de elasticidad. La resistencia al impacto mejora con la incorporación de fibras y con los tratamientos químicos. La hibridación tiene un efecto positivo en las propiedades de flexión del material biocompuesto. El tratamiento con bicarbonato exhibe el mejor comportamiento en todos los ensayos realizados.

Palabras clave: Biocompuestos, residuos agroindustriales, propiedades físico-mecánicas.

¹ Tesis de Maestría en Ingeniería, Universidad Autónoma Chapingo

² Autor de tesis

³ Director de tesis

PHYSICAL-MECHANICAL PERFORMANCE OF AN EPOXY MATRIX REINFORCED WITH
FIBER OF *Agave angustifolia* Haw⁴

Jorge Colin Torres⁵; Martin Hidalgo Reyes⁶

ABSTRACT

In México, around 15.6 million tons of agroindustrial waste is generated annually, among which the agave bagasse in the production of spirits stands out. Thus, in 2017, about 80,000 Ton of bagasse were generated from the production of 4 Mm³ of mezcal. In this study biocomposites of short bagasse fiber from *Agave angustifolia* Haw were developed and physical-mechanical performance was evaluated as a reinforcement of a low viscosity epoxy polymer matrix in a laminar biocomposite. First, panels of 200x110x3.8 mm³ were made, to test 12 combinations with three fiber contents (18, 24 and 30%), and four lengths of reinforcement (1, 3 and 6 mm, and mix), and were compared with the resin panels without fiber in parallel tensile and three-point bending tests. After choosing the best combination, the effect of chemical pretreatment with sodium bicarbonate, silane, and sodium hydroxide was evaluated at the fiber-matrix interface to increase mechanical strength (tensile, flexural, impact, and hardness) before and after water absorption. By means of Scanning Electron Microscopy (SEM) the fracture surfaces of the specimens tested at impact were observed to know the effect of the chemical treatments on the physical-mechanical properties of the material. Finally, the effect of hybridization on flexural strength was evaluated. The results show a decrease of the mechanical strength (tensile, flexural) with the incorporation of fibers, however, the modulus of elasticity increases in the two test modes. Chemical treatments have a positive effect on mechanical strength, however, tend to decrease the modulus of elasticity. Impact strength improves with the incorporation of fibers and chemical treatments. Hybridization has a positive effect on the flexural properties of the biocomposite material. The bicarbonate treatment exhibits the best performance in all the tests carried out.

Key words: Biocomposites, agroindustrial waste, physical-mechanical properties

⁴ Master's thesis in engineering, Universidad Autónoma Chapingo

⁵ Thesis author

⁶ Thesis advisor

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La actividad agroindustrial constituye un problema de generación de residuos en gran parte del mundo, debido a dos factores principales: el aumento en su producción y el consecuente impacto ambiental que muchos de estos residuos conllevan. En México, anualmente se generan cerca de 15.6 Mt de residuos agroindustriales (González *et al.*, 2015; Valdez *et al.*, 2010) entre los que destaca el bagazo de agave en la producción de bebidas espirituosas. Tan solo en este año, se estima la generación de 2.4 Mt de bagazo residual derivados de la producción de 28 Mm³ de destilado (SAGARPA, 2017) y se espera que esta cifra aumente a 3 Mt para el año 2030. Ante este panorama, existe la necesidad de conversión de estos en un producto útil y de mayor valor agregado (Jurado *et al.*, 2003). Además, el uso de estos subproductos tiene incidencia en la preservación de la calidad del medio ambiente al considerar el desarrollo de tecnologías orientadas hacia la transformación sustentable de los recursos naturales (Barragán *et al.*, 2008).

El uso de fibras naturales ha tomado mayor importancia a nivel mundial debido, principalmente, a las ventajas que proporcionan para el medio ambiente, ya que constituyen un recurso natural renovable, poseen baja densidad, alta rigidez y capacidad de biodegradarse. Fibras como el sisal, lino, palma, fique, formio, coco, bambú y otras han sido empleadas en el diseño de materiales. La mayoría de estos productos son desechos agroindustriales, lo que los ha convertido en un material atractivo para ser utilizadas como refuerzo en matrices poliméricas, puesto que ofrece varias ventajas, como su abundancia, bajo costo y buenas propiedades mecánicas (Cuéllar y Muñoz, 2010), además de su baja densidad comparada con las fibras sintéticas (Agrawal *et al.*, 2000). Algunos sectores, como el aeroespacial, el automotriz, del mueble y la construcción han mostrado gran interés por los biocompuestos reforzados con fibra natural (Salazar *et al.*, 2011) y en la búsqueda de fibras que puedan reemplazar adecuadamente a las fibras sintéticas, como la fibra de vidrio o combinarlas con éstas para la obtención de materiales compuestos altamente competitivos (Mohanty *et al.*, 2005). Los compuestos de polímeros reforzados con fibra natural se han convertido en un

área de investigación muy prometedora puesto que son ambientalmente superiores a los compuestos de fibra de vidrio, la fibra natural tiene un menor impacto ambiental en comparación con la producción de fibra de vidrio (Joshi *et al.*, 2004).

En México, se han realizado investigaciones para el aprovechamiento del bagazo poniendo especial atención en el agave tequilero (*Agave tequilana* Weber) para incluir sus fibras en refuerzo de biocompuestos y mejorar sus características. Torres *et al.*, (2017) estudiaron el efecto del contenido de fibra de los residuos de agave en las propiedades térmicas y mecánicas en matrices de polihidroxibutirato (PHB) y hidroxivalerato P (HB-HV). Los resultados mostraron que la adición de fibra de agave (30% en peso) en ambas matrices aumenta su módulo de tracción por 80 y 50% respectivamente, mientras que para su módulo de flexión el aumento fue de 36 y 41% respectivamente; en lo que respecta a la resistencia al impacto se obtuvo un aumento significativo en 44 y 66% respectivamente para los biocompuestos que contenían 30% en peso de fibra de agave. Mylsamy y Rajendran (2011) informaron que el tratamiento con álcali a fibras de *A. tequilana* conlleva a un aumento en las propiedades mecánicas (tensión, compresión, flexión e impacto) de los biocompuestos.

La fibra utilizada en esta investigación proviene del proceso de producción del mezcal que al igual que el tequila, es una bebida alcohólica tradicional de México, la cual es obtenida por procesos artesanales, así como por procesos tecnificados (Hernández *et al.*, 2016). El agave mezcalero ha sido utilizado desde hace aproximadamente 400 años en muchas áreas rurales de México, desde los estados del norte de Tamaulipas y Sonora, hasta Oaxaca en el sur (Aguirre y Eguiarte, 2013). Es un producto de gran importancia agroindustrial que se ha convertido en uno de los productos más representativos de México a nivel internacional, su carácter artesanal y su variedad de presentaciones lo han convertido en una bebida con alta demanda en mercados nacionales y extranjeros, consolidándose como motor de desarrollo económico, especialmente en zonas marginadas, donde mayoritariamente, son pequeños

productores los que se dedican a su fabricación (Cortés y Hernández, 2017). Esta bebida cuenta con denominación de origen (Figura 1).



Figura 1. Estados productores de mezcal con denominación de origen. FUENTE: CRM, 2017. <http://www.crm.org.mx>.

Durante la etapa de molienda de los gajos de maguey se genera el residuo denominado bagazo, del que se generan de 15 a 20 kg en base húmeda por cada litro de mezcal (Jacques *et al.*, 2007). Datos del Consejo Regulador del Mezcal (CRM, 2017) indican que, en 2017, se generaron cerca de 80 mil toneladas de bagazo derivados de la producción de 4 Mm³ de mezcal. Las fibras que se obtienen a partir del bagazo se consideraran desechos, puesto que no hay demanda industrial para ellas, por lo que no tienen costo, repercutiendo en problemas de contaminación debido a que los productores depositan estos residuos directamente al suelo sin ningún proceso previo. Con el fin de lograr un aprovechamiento integral de estas fibras, se han realizado estudios para caracterizar; química y morfológicamente (Hidalgo *et al.*, 2014) y mecánicamente (Silva *et al.*, 2009) las fibras del bagazo de maguey espadín (*Agave angustifolia* Haw). Estos autores demostraron que las fibras tienen características similares a otras fibras lignocelulósicas y que por ende pueden tener aplicación en diferentes campos, entre ellas los materiales compuestos. Por lo tanto, el presente estudio

tiene como objetivo desarrollar compuestos de fibra corta de *A. angustifolia* Haw, una de las plantas más utilizadas para la producción de mezcal, y describir el desempeño mecánico que presenta como refuerzo de una matriz de polímero termoestable de baja viscosidad en un biocompuesto laminar, tomando como parámetros críticos: longitud y contenido de fibra, tratamientos químicos y la hibridación con fibra de vidrio para establecer sus posibles aplicaciones.

1.1.- JUSTIFICACIÓN

La industria mezcalera genera grandes volúmenes de bagazo procedentes de la molienda durante el proceso de extracción de azúcares. En 2017 se desecharon 80 mil toneladas derivadas de la producción de 4 000 m³ de mezcal y se estima un aumento considerable en los próximos años. Las fibras que se obtienen a partir del bagazo se considerarían desechos puesto que no hay demanda industrial para ellas, por lo que no tienen costo, repercutiendo en problemas de contaminación debido a que los productores depositan estos residuos directamente al suelo sin ningún proceso previo. En atención a la responsabilidad ambiental y a las tendencias de aumento de disponibilidad de este residuo agroindustrial, es necesario encontrar una alternativa de aplicación para las fibras del bagazo cocido. Los materiales biocompuestos son una opción viable que podría ser una solución al problema de residuos generados en esta actividad puesto que se trata de un material lignocelulósico y puede servir como refuerzo en matrices poliméricas. Por lo tanto, es fundamental evaluar el comportamiento que tienen las fibras como refuerzo en materiales biocompuestos.

1.2.- OBJETIVOS

1.2.1.- Objetivo general

Elaborar un biocompuesto a base de resina epóxica y fibra de bagazo de *Agave angustifolia* Haw, y evaluar sus propiedades físico-mecánicas para determinar su aplicación.

1.2.2.- Objetivos específicos

- Evaluar el efecto que tiene el tamaño y el contenido de fibras en las propiedades mecánicas del material.
- Evaluar el efecto que tienen los tratamientos químicos a las fibras en las propiedades físico-mecánicas del material.
- Evaluar el efecto que tiene la absorción de humedad en las propiedades mecánicas del material.
- Evaluar el efecto que tiene la combinación de fibra de agave y fibra de vidrio (hibridación) en las propiedades mecánicas del material.
- Definir áreas de aplicación del material dependiendo de las características obtenidas.

1.3.- Organización de la tesis

Esta tesis está organizada en tres capítulos, incluyendo el presente (capítulo uno) donde se establece la conclusión general, la justificación y los objetivos del trabajo. En el capítulo dos se presenta una revisión de la literatura, en el capítulo tres se detalla el trabajo realizado en formato artículo y enviado a una revista científica. Finalmente se presenta un título de anexos donde se presenta un compendio de ilustraciones de los equipos utilizados para la realización del presente trabajo.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1.- Fibras naturales

Las fibras naturales son elementos que proceden de la naturaleza, es decir, se obtienen directamente de animales o de vegetales principalmente (Zimniewska y Wladyka, 2016). Éstas tienen, desde tiempos remotos una gran variedad de aplicaciones como la elaboración de hilos y textiles, utensilios, cuerdas, telas no tejidas y tejidas, materiales para construcción, etc. En la actualidad se han desarrollado investigaciones y tecnologías que permiten utilizarlas como refuerzos de matrices poliméricas y crear materiales compuestos con buenas características mecánicas, comparables con compuestos de fibras de vidrio (Ku *et al.*, 2011; Naidu y Suman, 2013; Reddy *et al.*, 2017; Sanjay *et al.*, 2018; Wambua y Verpoest, 2003). Reddy *et al.*, (2017) mostraron que las propiedades mecánicas (tracción, flexión e impacto) de compuestos reforzados con fibra de bambú son iguales a los compuestos reforzados con fibra de vidrio a una fracción de volumen y longitud de fibra particulares.

2.1.1.- Clasificación de las fibras de origen vegetal

Las fibras naturales se clasifican de acuerdo a sus orígenes, es decir, si se derivan de plantas, animales o minerales, como se muestra en la figura 1. Las fibras vegetales son las más populares de las fibras naturales, utilizadas como refuerzo en biocompuestos. Las fibras vegetales incluyen las fibras del tallo, hojas y semillas. En el tallo, hay una serie de haces de fibras, cada uno de los cuales contiene células o filamentos individuales de fibra, estas fibras reciben el nombre de liberianas. Entre estas fibras se pueden mencionar; el lino, cáñamo, yute, kenaf y ramio. Entre las fibras provenientes de hojas están; el sisal, el abacá, el banano, el agave y la piña. El algodón es la fibra de semilla más común (Akil *et al.*, 2011; Kozłowski y Wladyka, 2008; Sanjay *et al.*, 2015; Zimniewska y Wladyka, 2016; Zimniewska *et al.*, 2011).

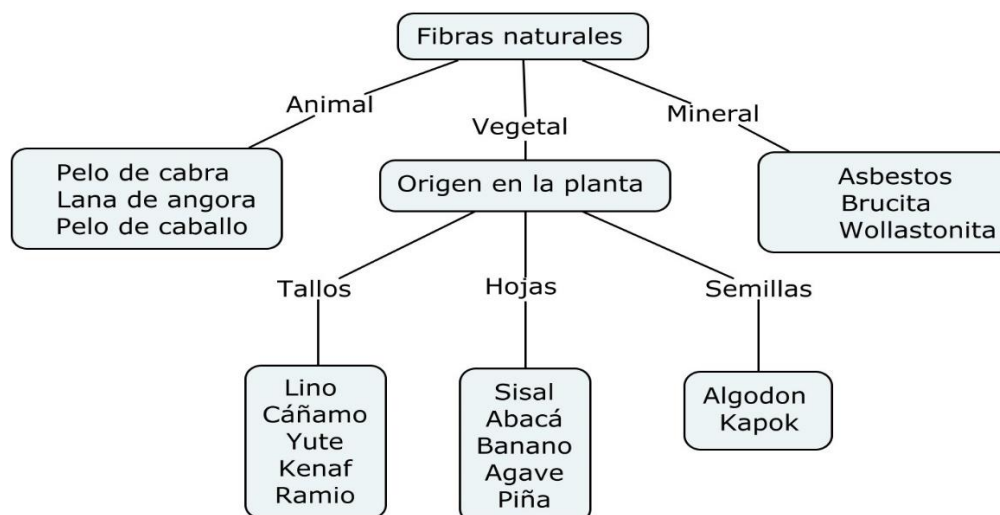


Figura 1. Clasificación de las fibras naturales. FUENTE: Akil et al., 2011.

El cuadro 1 muestra una lista de fibras vegetales de importancia según su origen en la planta. Las propiedades de las fibras naturales varían considerablemente dependiendo de si se toman del tallo de la planta, la hoja o la semilla y de las condiciones de crecimiento. Además, dependen del diámetro de la fibra, la estructura, el grado de polimerización (Bledzki y Gassan, 1999), así como del contenido de celulosa, y del ángulo micro fibrilar. Las fibras con mayor contenido de celulosa, mayor grado de polimerización y un ángulo micro fibrilar inferior presentan mayor resistencia a la tracción y mayor módulo (Thomas *et al.*, 2011)

Cuadro 1. Fibras vegetales de importancia según su origen

Fibra vegetal	Origen	Fibra vegetal	Origen	Fibra vegetal	Origen
Abacá	Hoja	Lino	Tallo	Piña	Hoja
Bagazo	-	Cáñamo	Tallo	Ramio	Tallo
Bambú	Tallo	Henequén	Hoja	Sisal	Hoja
Plátano	Tallo	Isora	Tallo	Calabaza	Fruto
Coco	Fruto	Yute	Tallo	Paja	Tallo
Algodón	Semilla	Capoc	Fruto	Cáñamo	Tallo
Curaua	Hoja	Kenaf	Tallo	Madera	Tallo

FUENTE: Thomas *et al.*, 2011.

2.1.2.- Estructura de las fibras de origen vegetal

Una fibra vegetal única o elemental es una célula típica de una longitud de 1 a 50 mm y un diámetro de aproximadamente 10-50 nm. Las fibras vegetales son como tubos microscópicos, es decir, paredes celulares que rodean el lumen central. El lumen contribuye al comportamiento de absorción de agua de las fibras vegetales (Tsoumis,1991). La fibra consiste en varias paredes celulares. Estas paredes celulares están formadas a partir de microfibrillas de celulosa semi-cristalina de refuerzo incrustadas en una matriz de hemicelulosa-lignina de composición variable. Tales microfibrillas tienen típicamente un diámetro de aproximadamente 10-30 nm y están constituidas por 30-100 moléculas de celulosa en conformación de cadena extendida y proporcionan resistencia mecánica a la fibra (Thomas *et al.*, 2011).

Las moléculas de hemicelulosa en la pared celular están unidas por hidrógeno a la celulosa y actúan como matriz de cementación entre las microfibrillas de celulosa, formando la red de celulosa-hemicelulosa, que se cree es el componente estructural principal de las células. Por otro lado, las ligninas hidrófobas actúan como un agente de cementación y aumentan la rigidez del compuesto de celulosa-hemicelulosa (Thomas *et al.*, 2011).

Las paredes celulares están divididas en dos secciones, la pared celular primaria contiene un número irregular de microfibrillas de celulosa, que están estrechamente empaquetadas. La pared secundaria está compuesta por tres capas: S1 (capa externa), S2 (capa media) y S3 (capa interna). La capa S2 es la más gruesa e importante en la determinación de propiedades mecánicas (Tsoumis, 1991). La figura 2 muestra la representación esquemática de la estructura fina de una fibra lignocelulósica. Estas paredes de células de fibra difieren en su composición, es decir, la relación entre celulosa y lignina / hemicelulosa y en la orientación o ángulo espiral de las microfibrillas de celulosa (Rong *et al.*, 2001).

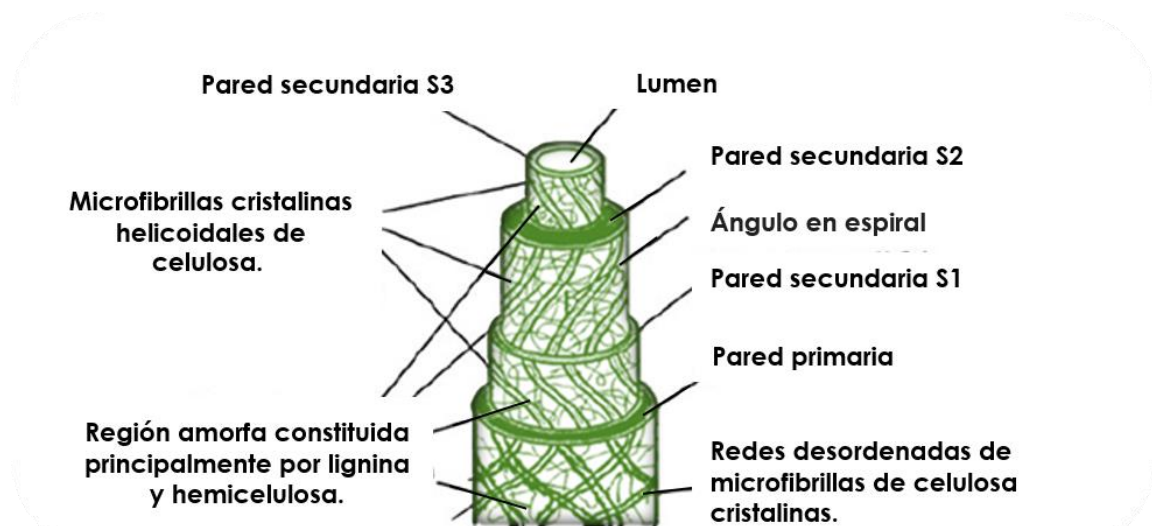


Figura 2. Estructura de una fibra lignocelulósica. FUENTE: Adaptado de Rong, 2001.

Las fibras celulósicas tienen dominios amorfos y cristalinos con un alto grado de organización. La velocidad de cristalinidad depende del origen del material. El algodón, el lino, el ramio, el sisal y el plátano tienen altos grados de cristalinidad (65-70%), pero la cristalinidad de la celulosa regenerada es sólo 35-40%. La eliminación progresiva de las partes menos organizadas conduce a fibrillas con cristalinidad siempre creciente, hasta casi el 100%. La cristalinidad de la celulosa resulta parcialmente de la unión de hidrógeno entre las cadenas celulósicas, pero también se produce algún enlace de hidrógeno en la fase amorfa, aunque su organización es baja (Rong, 2001). En la celulosa, existen muchos grupos hidroxilo disponibles para la interacción con el agua mediante enlaces de hidrógeno. Interactúan con el agua no sólo en la superficie, sino también en la masa. La cantidad de agua absorbida depende de la humedad relativa de la atmósfera confinada con la cual la fibra está en equilibrio. La isoterma de sorción del material celulósico depende de la pureza de la celulosa y del grado de cristalinidad. Todos los grupos -OH en la fase amorfa son accesibles al agua, mientras que sólo una pequeña cantidad de agua interactúa con los grupos -OH de superficie de la fase cristalina.

2.1.3.- Composición química de fibras vegetales

La composición química, así como la microestructura morfológica de las fibras vegetales, es compleja debido a la organización jerárquica de los diferentes compuestos presentes en diversas composiciones. Dependiendo del tipo de fibra, la composición química varía. Los componentes principales de las fibras naturales son: celulosa, hemicelulosa, lignina, pectinas y ceras (Thomas *et al.*, 2011). La información sobre la composición química de las fibras lignocelulósicas es importante porque determina sus propiedades y, por lo tanto, sus aplicaciones (Gurunathan *et al.*, 2015).

2.1.3.1.- Celulosa

La figura 3 muestra la estructura de la celulosa, el biopolímero más abundante en la naturaleza puesto que representa más del 40% de todo el carbono fijo de la biosfera. Es un polímero de condensación lineal que consta de unidades β -D-glucosa, unidas entre sí por enlaces β -1,4-glicosídicos en las posiciones C1 y C4 (Gurunathan *et al.*, 2015; Nevell y Zeronian, 1985). La estructura molecular de la celulosa, que es responsable de su estructura supramolecular determina muchas de sus propiedades químicas y físicas (Thomas *et al.*, 2011). La naturaleza hidrófila proviene de una gran cantidad de grupos hidroxilo unidos a los anillos de piranosa. La existencia de grupos OH en la celulosa también conduce a un gran número de enlaces de hidrógeno. Debido a estos enlaces de hidrógeno y las fuerzas de Van Der Waals, parte de las moléculas de celulosa se alinean entre sí, están altamente ordenadas y forman regiones cristalinas. Mientras tanto, las moléculas con disposición menos ordenada constituyen una región amorfa (Fuqua *et al.*, 2012).

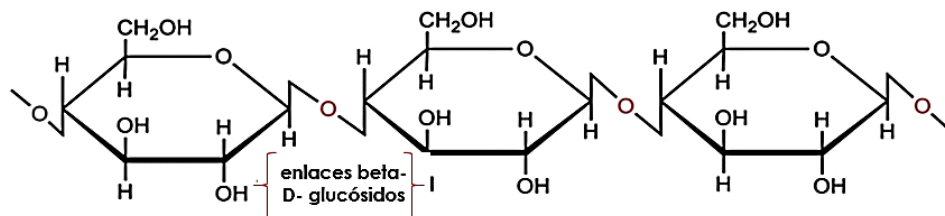


Figura 3. Estructura de la molécula de la celulosa. FUENTE: Gurunathan et al., 2015.

2.1.3.2.- Hemicelulosa

La hemicelulosa, el segundo material orgánico más abundante en la tierra después de la celulosa (Bledzki y Gassan, 1999). La hemicelulosa se diferencia de la celulosa en tres aspectos importantes. En primer lugar, La hemicelulosa es estructuralmente más compleja que la celulosa. Está unida al componente de celulosa y lignina por enlaces covalentes y no covalentes en la pared celular, las interacciones entre estos componentes aumentan la rigidez y flexibilidad de la pared celular de la fibra. En segundo lugar, las hemicelulosas son un grupo de homopolímeros y heteropolímeros que consisten principalmente en cadenas anhidro- β -(1-4)-D-xilopiranosas, glucopiranosas, manopiranosas y galactopiranosas, (Figura 4) con varios sustituyentes (Azwa *et al.*, 2013). Y finalmente el grado de polimerización de la celulosa nativa es aproximadamente 10 a 100 veces mayor que el de la hemicelulosa. Aunque los enlaces químicos entre celulosa y hemicelulosa no son covalentes, todavía son muy fuertes y difíciles de separar (Thomas *et al.*, 2011).

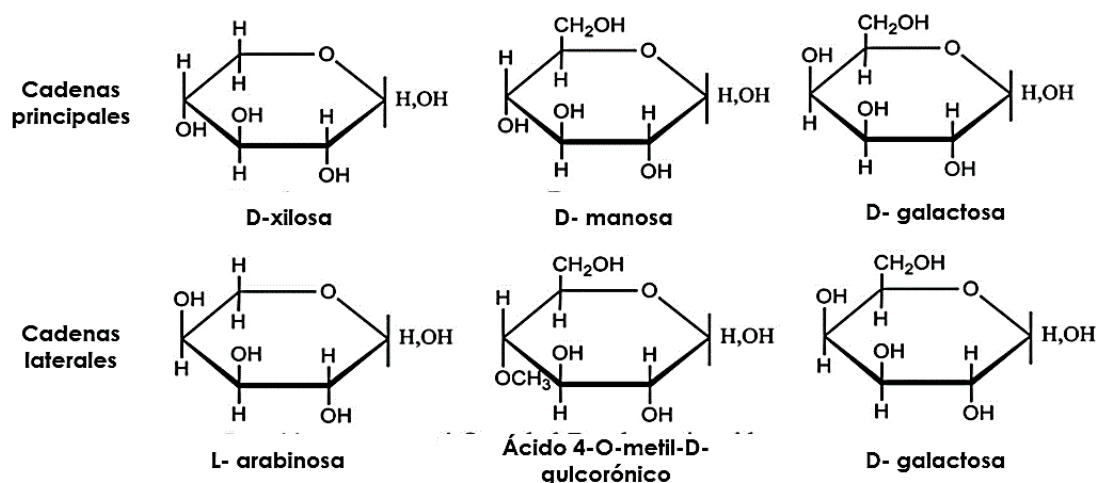


Figura 4. Estructura de la hemicelulosa. FUENTE: Gurunathan et al., 2015

2.1.3.3.- Lignina

La lignina es un polimérico natural que surgen de la polimerización deshidrogenativa iniciada por enzimas de tres precursores primarios: trans-coniferilo, trans-sinapilo y trans-pumarilo (Figura 5) (John y Thomas, 2008). Es altamente significativa por que representa aproximadamente el 30% de carbono orgánico en la biosfera. Es un polímero desordenado y reticulado que confiere rigidez a las plantas. A diferencia de la celulosa y las hemicelulosas a base de carbohidratos, la lignina es una molécula amorfa que contiene estructuras aromáticas en combinación con cadenas alifáticas. La polimerización de los monómeros de lignina se inicia con oxidasas o peroxidasas. Durante la biosíntesis de las paredes celulares de las plantas, la lignina se desarrolla entre las fibras de polisacárido (celulosa y hemicelulosa), uniéndolos entre sí. Este proceso de lignificación provoca un endurecimiento de las paredes celulares. La lignina es de naturaleza altamente hidrófoba y no es hidrolizada por los ácidos. Es soluble en álcali caliente, se oxida fácilmente y se condensa fácilmente con fenol. Las propiedades mecánicas de la lignina son más bajas que las de la celulosa (Fuqua *et al.*, 2012). Este polímero es muy resistente a la biodegradación y sus funciones son proteger a la celulosa del ataque microbiano,

conferir resistencia e impermeabilidad a los materiales lignificados, y mantener unidas las fibras celulósicas (Rodríguez, 2006).

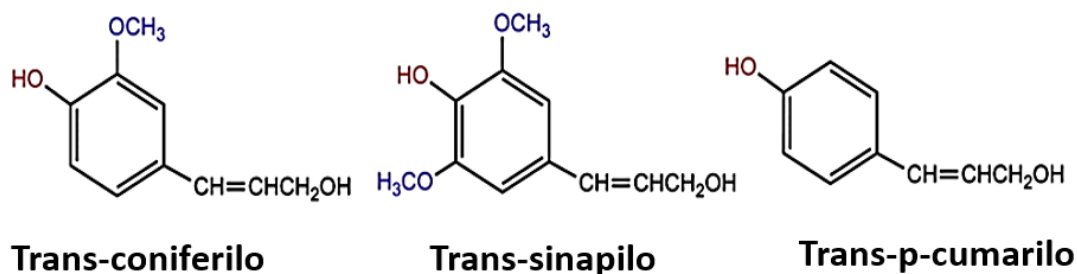


Figura 5. Estructura de monolignoles de la lignina. FUENTE: Gurunathan et al., 2015.

2.1.3.4.- Materiales extractivos

Además de la celulosa, hemicelulosas y ligninas, las paredes celulares de las plantas contienen otras moléculas orgánicas como pectinas, proteínas, taninos, ceras, aromáticos y carbohidratos de bajo peso molecular. Estos materiales se consideran no estructurales, es decir, aunque están presentes dentro de la pared celular, no forman parte de la estructura fundamental de la pared como la celulosa, las hemicelulosas y las ligninas. Sin embargo, tienen un efecto profundo sobre la naturaleza química de los materiales lignocelulósicos. Estos productos químicos naturales suelen ser solubles en agua y/o disolventes orgánicos y, por lo tanto, se clasifican generalmente como extractivos, lo que significa que pueden eliminarse o extraerse del material vegetal mediante un tratamiento químico (Thomas *et al.*, 2011). Con respecto a la fabricación de compuestos, los extractos son de importancia clave para dictar las interacciones químicas superficiales que afectan a la adhesión. El cuadro 2 muestra los principales componentes químicos para una amplia variedad de fibras.

Cuadro 2. Composición química de algunas fibras vegetales

Fibra	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Ceras (%)
Bagazo	55.2	16.8	25.3	-
Bambú	26-43	30	21-31	-
Lino	71	18.6-20.6	2.2	1.5
Kenaf	72	20.3	9	-
Jute	61-71	14-20	12-13	0.5
Cáñamo	68	15	10	0.8
Ramio	68.6-76.2	13-16	0.6-0.7	0.3
Abacá	56-63	20-25	7-9	3
Sisal	65	12	9.9	2
Coco	32-43	0.15-0.25	40-45	-
Aceite de palma	65	-	29	-
Piña	81	-	12.7	-
Curaua	73.6	9.9	7.5	-
Paja de trigo	38-45	15-31	12-20	-
Cascara de arroz	35-45	19-25	20	14-17
paja de trigo	41-57	33	8-19	8-38

FUENTE: Faruk *et al.*, 2012.

2.1.4.- Propiedades físico-mecánicas de las fibras vegetales

El desempeño de compuestos de polímeros reforzados con fibras naturales depende de varios factores; las dimensiones de las células (Thakur y Thakur, 2014), el ángulo micro fibrilar (Al-Oqla y Sapuan, 2014), los defectos (Hänninen *et al.*, 2012) la estructura (Ku *et al.*, 2011), las propiedades físico-mecánicas y la composición química de las fibras, así como la interacción de una fibra con el polímero (Faruk *et al.*, 2012). Con el fin de ampliar el uso de fibras naturales para compuestos y mejorar su rendimiento, es esencial conocer las características de

la fibra. La gama de los valores característicos es uno de los inconvenientes de todos los productos naturales, lo que puede explicarse por las diferencias en la estructura de la fibra debido a las condiciones ambientales generales durante el crecimiento. Las fibras naturales se pueden procesar de diferentes maneras para producir elementos de refuerzo con diferentes propiedades mecánicas. El cuadro 3 presenta las propiedades físico-mecánicas de las fibras naturales de uso común.

Cuadro 3. Propiedades físico-mecánicas de fibras naturales de uso común

Fibra	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alargamiento a la ruptura (%)	Densidad (g/cm ³)
Abacá	400	12	3-10	1.5
Bagazo	290	17	-	1.25
Bambú	140-230	11-17	-	0.6-1.1
Lino	345-1035	27.6	2.7-3.2	1-5
Cáñamo	690	70	1.6	1.48
Jute	393-773	26.5	1.5-1.8	1.3
Kenaf	930	53	1.6	-
Sisal	511-635	9.4-22	2.0-2.5	1.5
Ramio	560	24.5	2.5	1.5
Aceite de palma	248	3.2	25	0.7-1.55
Piña	400-627	1.44	14.5	0.08-1.6
Coco	175	4-6	30	1.2
Curaua	500-1150	11.8	3.7-4.3	1.4

FUENTE: Hoareau et al., 2004

La naturaleza hidrófila de las fibras es un problema importante si se usan como refuerzo en matrices poliméricas ya que influye en las propiedades mecánicas (Faruk et al, 2012). Los tratamientos químicos para la fibra natural son necesarios para lograr buenas propiedades de interfaz. Los grupos funcionales reactivos en los tratamientos químicos tienen la capacidad de reaccionar en las estructuras de las fibras y alterar su composición (Mohammed et al., 2015).

2.1.5.- Aplicaciones de las fibras naturales

Las fibras naturales poseen resistencia y rigidez suficientes, pero son difíciles de usar en aplicaciones de soporte de carga por sí mismas debido a su estructura fibrosa. La mayoría de los plásticos no son adecuados para aplicaciones de carga debido a su falta de resistencia, rigidez y estabilidad dimensional (Mohanty *et al.*, 2005). En los materiales compuestos reforzados con fibras naturales, las fibras sirven como refuerzo al dar resistencia y rigidez a la estructura, mientras que la matriz de plástico sirve como adhesivo para mantener las fibras en su sitio de manera que se pueden hacer componentes estructurales adecuados. Los materiales compuestos de fibra natural pueden ser materiales muy económicos para las siguientes aplicaciones: Industria de la construcción; paneles, falsos techos, tabiques, paredes, pisos, ventanas, marcos de puertas y tejas, dispositivos de almacenamiento; buzones de correo, silos de almacenamiento de granos, contenedores de biogás, muebles; silla, mesa, ducha, unidades de baño, aplicaciones cotidianas; pantallas de lámparas, maletas, cascos, industria automotriz; interiores y exteriores. Las razones para la aplicación de fibras naturales en la industria automotriz incluyen: baja densidad, lo que puede llevar a una reducción de peso del 10 al 30%, propiedades mecánicas aceptables, buenas propiedades acústicas, entre otras (Chandramohan y Marimuthu, 2011).

2.2.- Materiales compuestos

Los materiales compuestos son el producto de la combinación de materiales simples con diferentes características, cuyas propiedades son mejores que las de los constituyentes de manera individual. Están formados por dos fases: la matriz y el refuerzo. La matriz es el lugar donde se encuentra alojado el refuerzo y es distinguible a simple vista por ser un medio continuo. La matriz otorga al compuesto ductilidad, tenacidad y transmite los esfuerzos inducidos a los refuerzos para que estos soporten la mayor parte de la fuerza aplicada. A la matriz se suele adicionar refuerzos de otros materiales en forma de: fibras, partículas, etc., con la finalidad de elevar las propiedades mecánicas de ésta (Guerrero *et al.*, 2013). Las propiedades de un material compuesto dependen del

material de refuerzo, de su distribución en la matriz y su interacción (Dato, 2012), ya que estos determinan la estructura interna del material compuesto (Mitchell, 2004).

2.2.1.-Clasificación de materiales compuestos

Los compuestos pueden ser clasificados de acuerdo con el tipo de matriz. Así se tienen compuestos de matriz metálica, cerámica y compuestos de matriz polimérica. La aplicación a la que se va a destinar el material compuesto dicta la matriz que se debe escoger (Guerrero *et al.*, 2013) y a la temperatura de servicio. Los materiales compuestos de matriz polimérica son apropiados hasta 200°C, los de matriz metálica hasta casi la temperatura de fusión de la aleación correspondiente, y las matrices cerámicas para temperaturas extremas (Jang, 1994). La matriz de las fibras naturales incluye polímeros termoestables y termoplásticos (Sobczak *et al.*, 2012).

2.2.1.1.- Biocompuestos de matriz termoestable

Estos materiales están formados por una matriz polimérica que endurece bajo la acción del calor y presión, y por la fibra que actúa como refuerzo. La función principal de la matriz termoestable es transferir la carga de una fibra a la siguiente (Verma y Sharma, 2017). Debido al bajo costo y la simplicidad en el procesamiento debido a la baja viscosidad y al rápido tiempo de curado, los polímeros termoestables utilizados generalmente en las industrias automotrices son resinas de poliéster o de éster de vinilo. Las resinas epóxicas ciertamente tienen mejores propiedades mecánicas en comparación con las anteriores, pero su precio es alto por lo que se utilizan con frecuencia en compuestos aeroespaciales (Verma y Sharma, 2017).

La comunidad científica tiene gran interés en los materiales de matriz termoestable reforzados con fibras naturales. En las investigaciones se han hecho propuestas para modificar la superficie de las fibras con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas y la unión interfacial entre la matriz y el refuerzo, entre otras características. Mysamy y Rajendran (2011) analizaron el efecto del tratamiento alcalino en las propiedades mecánicas de compuestos de

matriz epóxica reforzados con fibras cortas de agave y encontraron que efectivamente se mejora ligeramente las propiedades mecánicas, además se mejora la unión interfacial entre la fibra y la matriz.

2.2.1.2.- Biocompuestos de matriz termoplástica

Los materiales termoplásticos están constituidos por un polímero que puede ablandarse o fundirse mediante la aplicación de calor (Verma y Sharma, 2017). Puede procesarse en estado suavizado o en estado líquido debido a su estructura molecular lineal o muy poco ramificada, que al ser sometida a la acción del calor se funde y solidifica rápidamente al enfriarse. Los polímeros termoplásticos pueden procesarse repetidamente mediante la aplicación de calor y pueden reciclarse para fabricar nuevos productos, pero se debe tener en cuenta que el procesamiento repetido puede causar degradación o falla en algunas de sus propiedades. Entre las diversas técnicas de fabricación utilizadas para el desarrollo de las piezas termoplásticas se puede mencionar, el moldeo por inyección, moldeo por soplado y termoformado. La principal ventaja de usar termoplásticos es su reciclabilidad, además, estos tienen una buena ductilidad y buena resistencia al impacto. También en relación con el tiempo de procesamiento de las piezas termoplásticas es notablemente menor que el de las piezas termoestables. La razón de esto es que las piezas termoestables implican una reacción química de reticulación en el molde, que, dependiendo de los diversos parámetros, como la temperatura del molde y el espesor de la pieza, puede demorar de varios minutos a varias h para el procesamiento final. Por otro lado, el procesamiento de compuestos termoplásticos no requiere ninguna reacción química en el molde (Verma y Sharma, 2017). Las matrices termoplásticas originan materiales de baja densidad, bajo impacto ambiental y de buenas propiedades. Estas características las hacen aptas para el uso en el mercado automotriz, puesto que pueden proporcionar una buena apariencia externa, buen aislamiento acústico, un producto final inodoro y resistencia al envejecimiento. Los polímeros termoplásticos utilizados como matriz en compuestos incluyen entre otros: polietileno, polipropileno, poliuretano y policloruro de vinilo.

Las investigaciones realizadas utilizando matrices termoplásticas se enfocan principalmente en ver el efecto que tienen las modificaciones en la interfaz fibra-matriz sobre las propiedades finales del material compuesto. Tronc *et al.*, (2007) analizaron el efecto que tiene la esterificación de fibras de agave azul para el refuerzo de compuestos termoplásticos y encontró que este tratamiento tuvo efecto positivo en las propiedades mecánicas, principalmente en las propiedades de resistencia al impacto.

2.2.2.- Aplicación de biocompuestos reforzados con fibras de origen vegetal

Las fibras naturales han permitido la creación de una nueva generación de materiales amigables con el medio ambiente y como una alternativa viable a los compuestos reforzados con fibra de vidrio, especialmente en aplicaciones de productos de construcción, automotriz y aeroespacial (Mohanty *et al.*, 2002; Thakur y Thakur, 2014).

En los Estados Unidos, los materiales de construcción compuestos están hechos con fibras naturales. Usan paneles aislantes estructurales de polímeros reforzados con fibra natural (Uddin y Kalyankar, 2011). En Alemania, los fabricantes de automóviles alemanes, Mercedes, BMW, Audi y Volkswagen han empezado a fabricar compuestos de fibra natural para aplicaciones interiores y exteriores. Mercedes-Benz utilizó una matriz epóxica con la adición de yute en los paneles de las puertas en sus vehículos de clase E en 1996 (Mohanty *et al.*, 2005). La primera versión de biocompuestos para exteriores apareció en el año 2000, cuando el modelo de Mercedes-Benz, Travego estaba equipado con un motor reforzado con poliéster-lino y cajas de transmisión para aislamiento acústico (Koronis *et al.*, 2013). Estas son las primeras muestras de uso de fibras naturales para componentes exteriores estándar en un vehículo de producción y representan un hito en la aplicación de fibras naturales (Mohanty *et al.*, 2005)

Otro paradigma de la aplicación de compuestos de fibra natural apareció comercialmente en el año 2000, cuando Audi lanzó el automóvil A2 de gama media: el adorno de la puerta los paneles estaban hechos de poliuretano

reforzado con un material mixto de lino / sisal. Toyota desarrolló un plástico ecológico hecho de caña de azúcar y lo usará para revestir los interiores de los autos (Koronis *et al.*, 2013).

En aplicaciones estructurales y aplicaciones de infraestructura, los materiales compuestos de fibra natural se han utilizado para desarrollar elementos de carga, como vigas, techos, paneles de usos múltiples, tanques de agua y puentes peatonales (Ticoalu *et al.*, 2010; Uddin y Kalyankar, 2011). Los compuestos de fibra natural exhiben buenas propiedades específicas, pero hay una gran variabilidad en sus propiedades (Sanjay *et al.*, 2016) que dependen de factores como la adhesión fibra-matriz, la relación longitud- diámetro de las fibras, su orientación en los compuestos, de la fracción de volumen o peso de fibra y matriz, e incluso del proceso de fabricación (Herrera y Valadez, 2005).

2.2.3.- Mecanismos de adhesión

La adhesión es un fenómeno complejo que involucra la interacción física y química de escalas moleculares y macroscópicas (Stokke *et al.*, 2013). Las principales aplicaciones de la adhesión son la unión por adhesivos, esta técnica reemplaza, al menos parcialmente, las técnicas de sujeción mecánica más clásicas, como el atornillado o el remachado. Sin embargo, no son las únicas aplicaciones de adherencia. Está involucrada siempre que los sólidos se ponen en contacto, como en revestimientos, pinturas y barnices; sándwiches de varias capas; mezclas de polímeros; polímeros rellenos; y materiales compuestos. Dado que el rendimiento final de estos materiales multicomponentes depende significativamente de la calidad de la superficie de contacto que se forma entre los sólidos, es comprensible que se requiera un mejor conocimiento del fenómeno de adhesión para las aplicaciones prácticas (Mulhouse y Newton, 2003). Stokke *et al.*, (2013) categorizaron las teorías de adhesión en dos clases separadas: adhesión mecánica y adhesión específica; esta última incluye las subcategorías de modelo electrónico, modelo de difusión, modelo de adsorción y modelo adhesión química.

2.2.3.1.- Adhesión mecánica

La adhesión mecánica o el enclavamiento mecánico se ha considerado durante mucho tiempo como un mecanismo de unión importante en todos los sustratos porosos, por ejemplo, madera, papel, tela, cuero, etc. El flujo de adhesivo y la penetración en las cavidades o poros de la superficie, seguidos del curado del adhesivo, dan como resultado un sistema sólido de adhesivo-sustrato. La escala de las interacciones mecánicas varía desde la nanoescala en sistemas tan divergentes como el polímero-metal, polímero-polímero o polímero-madera (Stokke *et al.*, 2013).

2.2.3.2.- Teoría electrónica o electrostática

La teoría electrónica sugiere la formación de una doble capa de carga electrostática en la interfaz sustrato-adhesivo. La formación de esta carga depende de las propiedades del material que permiten la transferencia de electrones a través de la interfaz junto con el contacto íntimo de las superficies. Las interacciones así desarrolladas son muy débiles e insignificantes, tanto que esta teoría es generalmente la más controvertida de todas las teorías de adhesión, ya que la evidencia que la respalda es la más difícil de obtener. En cualquier caso, este mecanismo o teoría no es importante para la unión de madera u otros sustratos porosos naturales (Stokke *et al.*, 2013).

2.2.3.3.-Teoría de difusión

La teoría de la difusión se aplica solo cuando, tanto el adhesivo como el adherente son polímeros y, además, son compatibles. Esto se basa en el concepto de que la atracción o autoadhesión dentro de un sistema de polímero homogéneo se debe a la movilidad de los extremos de las cadenas macromoleculares y a la solubilidad mutua de dichas moléculas. La consecuencia de tal interacción es la desaparición de la interfaz, equiparada con la formación de una nueva. Esto puede ocurrir, por ejemplo, en polímeros termoplásticos sintéticos (Stokke *et al.*, 2013).

2.2.3.4.- Teoría de adsorción

El modelo de adsorción se basa en la premisa de que el contacto íntimo entre el adhesivo y el adherente produce interacciones moleculares en la interfaz que son necesarias, pero no las condiciones suficientes para una adhesión efectiva. Las interacciones ácido-base de van der Waals y Lewis son las fuerzas interfaciales generalmente consideradas de importancia porque representan las interacciones moleculares fundamentales que contribuyen a la adhesión.

La teoría de la adsorción también se conoce como la teoría de la adsorción termodinámica o simplemente como el modelo de humectación. La humectación o propagación de un adhesivo líquido sobre un sustrato sólido se controla mediante las características de energía de la superficie de líquido y sólido. Una vez que se produce la humectación del sustrato, la penetración del adhesivo, seguida por el curado del adhesivo, producirá una unión adhesiva (Stokke *et al.*, 2013). La teoría de la adsorción es, en la actualidad, el modelo de adhesión más prevalente y aceptado. Es aplicada para la adhesión polímero-polímero y, por lo tanto, es directamente aplicable a la mayoría de las interacciones adhesivo-sustrato lignocelulósico de interés práctico

2.2.3.5.- Teoría de enlace químico

Es comprensible que los enlaces químicos formados a través de la interfaz adhesivo-sustrato puedan mejorar considerablemente el nivel de adhesión entre los dos materiales. Estos enlaces generalmente se consideran enlaces primarios en comparación con los físicos, como van der Waals, que se denominan interacciones de fuentes secundarias. Los términos primario y secundario se derivan de la fuerza relativa o energía de enlace de cada tipo de reacción. La fuerza típica de un enlace covalente, por ejemplo, es del orden de 100 a 1000 kJ/mol, mientras que las interacciones de van der Waals y los enlaces de hidrógeno no superan los 50 kJ/mol. La formación de enlaces químicos depende de la reactividad, tanto del adhesivo como del sustrato (Schultz y Nardin, 1999).

En los materiales compuestos reforzados con fibra natural, la interfaz fibra-adhesivo es afectada debido a que poseen una naturaleza hidrofílica mientras

que la matriz de refuerzo es de carácter hidrofóbico. En este sentido, se han hecho investigaciones dirigidas a mejorar la compatibilidad y lograr la mejor unión entre fibras y matriz en su zona de interfaz. Se han propuesto métodos físicos y químicos que permiten modificar la superficie de las fibras vegetales, tales como: el tratamiento corona, de plasma frío, la mercerización, la copolimerización de injertos monómeros en la superficie de las fibras, entre otras. Se conoce también que el uso de agentes de acoplamiento como silanos, titanatos y circonatos que mejoran la adhesión fibra matriz (Herrera y Valadez, 2005).

Cisneros *et al.*, (2016) investigaron los efectos de seis tratamientos químicos diferentes a la fibra (álcali, aldehído, MAPE, ácido acrílico, metacrilato y silano) sobre las propiedades físicas y mecánicas de compuestos de matriz de polietileno LMDPE, polietileno lineal de media densidad, reforzado con fibras de *A. tequilana*. Las seis modificaciones químicas causaron cambios en la morfología y el entorno químico de la superficie de la fibra de agave. Además, con la realización de tratamientos químicos se obtiene menor peso y mayor rigidez que otorgan a los compuestos mejores propiedades específicas. Finalmente, demostraron que el tratamiento con MAPE es el más eficaz y muestra mayores aumentos en todas las propiedades mecánicas probadas y una menor absorción de agua de los compuestos. La interfaz fibra-matriz se mejoró con este tratamiento que resultó en módulos mejorados de dureza (4%), tracción (30%) y flexión (7%), así como resistencia a tracción (13%) y flexión (16%) sobre LMDPE puro.

Herrera y Valades (2005) estudiaron el comportamiento mecánico de un compuesto cáñamo-HDPE (polietileno de alta densidad). Se alteró la interacción fibra-matriz modificando las propiedades de la superficie de la fibra. Primero se incrementó el área de contacto para exponer las microfibras y para mejorar la humidificación y la impregnación de estas. Se les trató además con silano como agente de acoplamiento. Los autores señalaron que, debido al tratamiento de la superficie, se mejoró la adhesión fibra-matriz, logrando disminuir la relación L/d de la fibra de 72 a 20 en promedio. También observaron un incremento en las

propiedades de tensión y flexión entre un 3 y 30% y el esfuerzo al corte se incrementó en un 25%.

2.3.- Procesos de fabricación de compuestos de matriz termoestable

La característica común a todos los procesos de fabricación de compuestos es el de combinar una resina, un agente de curado y cierto tipo de fibra de refuerzo. Los sistemas de fabricación se diferencian en procesos de molde abierto o cerrado, según el sistema de contacto.

2.3.1.- Sistemas abiertos

1.3.1.1.- Hand lay up (colocación manual)

La colocación manual es un proceso de moldeo abierto para producir un producto compuesto de polímero. Se aplica un agente de desmoldeo en la superficie del molde para quitar fácilmente los productos compuestos terminados (Sapuan y Yusoff, 2015; Verma y Sharma, 2017). La colocación de un elemento comienza con la aplicación de una capa de gel en la superficie del molde. Debe ser una capa rica en resina y el propósito es evitar que las fibras aparezcan en la superficie del molde. Luego, se aplican capas escalonadas de resina y capas de fibra cortada. Se usa un rodillo para consolidar los compuestos. El proceso se repite con más capas hasta obtener el espesor deseado. Finalmente, los compuestos se curan a temperatura ambiente o en un horno (Sapuan y Yusoff, 2015; Srinivas *et al.*, 2017). Las resinas utilizadas en este proceso deben tener una viscosidad baja para poder trabajar a mano (Srinivas *et al.*, 2017). Las resinas termoestables como poliéster insaturado, éster vinílico y epóxicas están entre las más utilizadas (Sapuan y Yusoff, 2015).

2.3.1. 2.- Spray up (atomización)

El método de atomización es una técnica directa para encapsular la nanofibra en la matriz de polímero de manera homogénea (Xie *et al.*, 2010). En este proceso, la resina catalizada y las fibras se pulverizan simultáneamente con una cantidad fija de catalizador de peróxido, sobre la superficie del molde recubierta de gel.

Este proceso se repite hasta que se haya alcanzado una capa del espesor requerido (Verma y Sharma, 2017).

2.3.1.3.- Embobinado de filamentos

El embobinado de filamentos es un proceso automatizado de fabricación de material compuesto que implica el arrollamiento de fibra o cinta impregnada con resina alrededor de un mandril para lograr la forma deseada. En este proceso, el refuerzo continuo de fibras pasa a través de un lote de resina a una cabeza de alimentación y se enrolla alrededor de un mandril de diseño adecuado (Verma y Sharma, 2017; Misri *et al.*, 2015). El curado del mandril se consigue calentándolo en un horno o por radiación infrarroja. Los parámetros de proceso que generalmente se consideran incluyen el hilo de filamento exacto, la colocación longitudinal y la velocidad de devanado del mandril (Verma y Sharma, 2017)

2.3.2.- Sistemas cerrados

2.3.2.1.- Moldeo por inyección

El moldeo por inyección consiste en inyectar utilizando un tornillo giratorio, un polímero fundido en una cavidad cuyas paredes se mantienen a una temperatura por debajo de la temperatura de solidificación o la temperatura de transición vítrea del polímero utilizado. Se compone generalmente de dos grupos funcionales: el grupo de inyección y el grupo de molde. El proceso de inyección comprende una primera etapa de mezclar y plastificar los gránulos de material compuesto cuando se gira el tornillo plastificado, cuando se gira el tornillo plastificado y el polímero fundido o compuesto de polímero se pasa a través de un orificio en una cavidad del molde, es decir, una etapa de llenado, donde se solidifica bajo presión en la forma de la cavidad del molde, y luego se inyecta la masa fundida en la cavidad por traslación de los tornillos del polímero, después de enfriar el material del polímero en el molde, el producto final es expulsado (Qaiss *et al.*, 2015). Este proceso se utiliza básicamente para hacer las partes o componentes mediante el uso de polímeros termoplásticos, pero después de ciertas modificaciones, se puede utilizar para hacer los componentes o partes hechas de polímeros termoestables. Los principales beneficios de la técnica de moldeo por inyección

son tiempos de ciclo cortos, los componentes en forma compleja pueden ser fácilmente fabricados con esta técnica, tolerancias dimensionales superiores y acabado (Verma, 2015).

2.3.2.2.- Moldeo por extrusión

La extrusión es un proceso donde el material fundido es forzado a través de un troquel para producir: láminas, películas, mangueras, fundas, etc. Esta técnica se incluye en la categoría de producción continua con buenos beneficios económicos. La extrusión se hace totalmente controlada por computadora con varias funciones y parámetros tales como temperaturas de secado, presión y tasa de entrega. Este proceso implica o utiliza diferentes tipos de extrusores tales como extrusores de tornillo único y extrusores de doble husillo que se utilizan para comprimir y eliminar el aire atrapado entre los polímeros (Verma y Sharma, 2017).

2.3.2.3.- Moldeo por compresión

El moldeo por compresión es un proceso de fabricación de compuestos que normalmente se utiliza para producir componentes en un alto volumen de producción. Hay dos tipos de moldeo por compresión: moldeo por compresión en frío y por compresión en caliente. Para preparar muestras compuestas por moldeo por compresión a escala de laboratorio, los pellets compuestos se preparan normalmente utilizando una mezcladora interna y una extrusora de doble tornillo. En el moldeo por compresión en frío, el proceso de curado tiene lugar a temperatura ambiente, mientras que para el prensado en caliente se realiza aplicando calor al molde y, a su vez, se transfiere a los materiales compuestos. Las matrices utilizadas en este proceso incluyen poliéster insaturado, éster vinílico y fenólico para polímeros termoestables, mientras que, entre los polímeros termoplásticos, se pueden usar polipropileno, polietileno y poliamida (Sapuan y Yusoff, 2015).

2.3.2.4.- Pultrisión

El proceso es similar al proceso de extrusión, pero en la pultrisión, el producto se desarrolla tirando de los materiales en lugar de empujar los materiales a través

de la matriz como en el caso de la extrusión. Las cintas o cintas continuas se tiran mediante un extractor a través de un baño de resina de polímero termoestable. Los ejemplos de polímeros termoestables que se pueden usar en este proceso incluyen resina epóxica y poliéster insaturado. Los compuestos de fibra impregnados resultantes abandonan el baño de resina y se extraen y pasan a través de una serie de troqueles de formación. La forma del producto final sigue la forma de los troqueles, puede ser circular, rectangular, cuadrada y en secciones I o H (Sapuan y Yusoff, 2015). El compuesto también se cura en uno de los troqueles y se corta automáticamente a la longitud deseada. Los compuestos pultruidos normalmente comprenden hasta el 70% del contenido de fibra, y los productos son muy rígidos. Además, la facilidad de fabricación y la rentabilidad de este proceso lo convierten en una de las técnicas más importantes para la producción de materiales compuestos (Fairuz *et al.*, 2015).

2.3.2.5.- Moldeo por transferencia de resina (RTM)

RTM es un proceso establecido de fabricación de compuestos que normalmente se utiliza para fabricar componentes para automóviles y aeronaves (Sapuan y Yusoff, 2015). Se utiliza cuando se requiere que las dos caras de la pieza sean dos superficies lisas. Estos refuerzos denominados preformas se unen mediante un aglomerante termoplástico y luego se colocan dentro de la cavidad del molde. Después se pone la segunda pieza del molde sobre la primera y se inyecta resina a presión o vacío en la cavidad. Una vez que todo el tejido impregnado, las entradas de resina se cierran, y puede comenzar el curado de la pieza. Las resinas que se usan particularmente en este proceso incluyen poliéster, epoxi, éster vinílico y fenólico (Verma, 2015; Sapuan y Yusoff, 2015).

2.4.- Propiedades de compuestos reforzados con fibras de origen vegetal.

La caracterización mecánica de los compuestos reforzados con fibra, no solo dependen de las propiedades de la fibra, sino también del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la fase matriz. Dentro de la mecánica de los materiales existen parámetros para caracterizar su comportamiento

mecánico, tales como módulo de elasticidad, resistencia a la tensión, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, resistencia al impacto y la dureza.

2.4.1.- Diagrama esfuerzo-deformación

Las propiedades mecánicas están relacionadas estrechamente con sus componentes y estructura. El comportamiento de los materiales al aplicar fuerzas; está representado por las curvas características de esfuerzo-deformación bajo cargas estáticas y dinámicas. El diagrama esfuerzo-deformación (Figura 6) es una representación gráfica de un ensayo de tensión, en el cual se describe el comportamiento de la probeta ensayada desde el inicio de la carga hasta el punto de rotura, lo que determina que el esfuerzo σ sea medido como una función de la deformación unitaria ε .

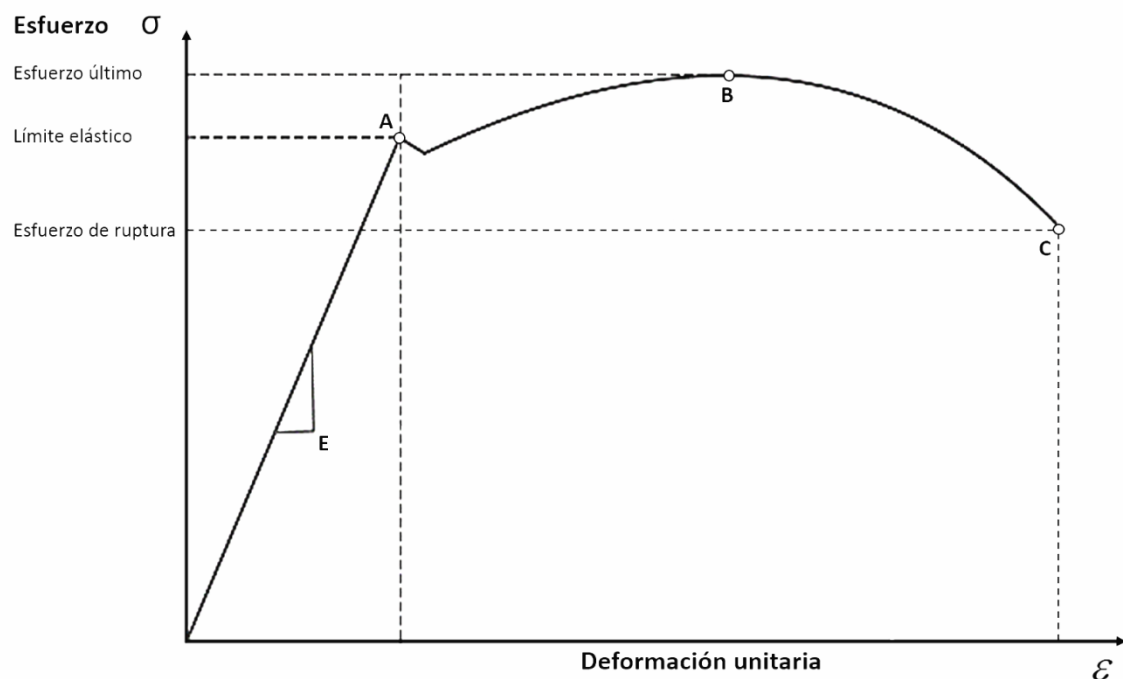


Figura 6. Curva típica esfuerzo-deformación de un material dúctil.
FUENTE: Valdés *et al.*, 2014.

2.4.2.-Esfuerzo

El esfuerzo σ es una medida de la fuerza F [N] perpendicular aplicada sobre la superficie y dividida por su área A [mm²], se expresa en MPa [N/mm²], se calcula con la ecuación (1).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

2.4.3.- Deformación unitaria

La deformación unitaria es el desplazamiento axial o transversal entre dos puntos originado por la aplicación de una fuerza sobre un material, dividido entre la longitud original de la probeta, obtenida por la ecuación (2)

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad (2)$$

Donde:

L_f es la longitud inicial, mm y

L_i es la longitud final, mm

2.4.4.- Resistencia a la tensión

También conocida como resistencia última a la tensión (RUT), es el valor de la carga específica bajo la cual el material se rompe, es expresada en MPa (N/mm²) y se localiza en el punto C de la figura 6.

2.4.5.- Resistencia a la flexión

También conocida como módulo de ruptura (MOR), es una propiedad de los materiales que se manifiesta como esfuerzos ocurridos justo antes de ceder en una prueba de flexión, es expresada en MPa (N/mm²). Se calcula con la ecuación (3).

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (3)$$

Donde:

σ_f es la resistencia a la flexión [MPa]

F es la carga sobre el punto de fractura [N]

L es la distancia entre los soportes [mm]

b es el ancho de la probeta [mm]

d es el espesor de la probeta [mm]

2.4.6.- Resistencia al impacto

La resistencia al impacto es la capacidad de un material para resistir la rotura bajo una carga de impacto o la capacidad de resistir la fractura bajo carga aplicada a alta velocidad. La resistencia al impacto de materiales compuestos se rige principalmente por dos factores: primero, la capacidad del relleno para absorber la energía que puede detener la propagación de grietas y segundo, la mala unión interfacial que induce a la aparición de micro espacios entre el relleno y la matriz, lo que resulta en la fácil propagación de grietas.

La energía de impacto E, se define como la energía consumida en acelerar, deformar y romper la probeta durante la flexión. Esta energía se obtiene de la prueba de Impacto Charpy.

La resistencia al impacto Charpy $a_c N$ se define como la energía de impacto a la rotura con respecto al área de la sección transversal inicial de la superficie impactada. Se calcula con la ecuación (4).

$$a_c N = \frac{E}{h} \times 10^3 \quad (4)$$

Donde:

$a_c N$ es la resistencia al impacto [J/m]

E es la energía absorbida en la rotura [J]

h es el espesor de la probeta [mm]

2.4.7.- Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad o módulo de Young es una medida del esfuerzo necesario para producir un pequeño alargamiento del 1%, definido como la tangente del ángulo entre la parte inicial de la curva cercana al origen y el eje horizontal, correspondiente a la zona de elasticidad de la curva esfuerzo-

deformación unitaria, sus unidades son los MPa (N/mm²). Se calcula según la ley de Hooke con la ecuación (5).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \tan \alpha \quad (5)$$

Donde:

E es el módulo de elasticidad [MPa]

σ es el esfuerzo máximo [MPa]

ε es la deformación unitaria

Como medida de rigidez, un alto módulo indica inextensibilidad y uno bajo corresponde a la flexibilidad. De manera gráfica el módulo de elasticidad se calcula trazando una pendiente a la curva respecto al origen y registrando los valores del esfuerzo y la deformación en el punto A como se ve en la figura 6.

2.5 Literatura citada

- Agrawal, R., Saxena, N. S., Sharma, K. B., Thomas, S., & Sreekala, M. S. (2000). Activation energy and crystallization kinetics of untreated and treated oil palm fibre reinforced phenol formaldehyde composites. *Materials Science and Engineering: A*. **277(1-2)**, 77-82. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)005560](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)005560)
- Aguirre-Dugua, X., & Eguiarte, L. E. (2013). Genetic diversity, conservation and sustainable use of wild *Agave cupreata* and *Agave potatorum* extracted for mezcal production in Mexico. *Journal of Arid Environments*. **90**, 36-44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.018>
- Akil, H., Omar, M. F., Mazuki, A. A. M., Safiee, S. Z. A. M., Ishak, Z. M., & Bakar, A. A. (2011). Kenaf fiber reinforced composites: A review. *Materials & Design*. **32(8-9)**, 4107-4121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.008>
- Al-Oqla, F. M., & Sapuan, S. M. (2014). Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. *Journal of Cleaner Production*. **66**, 347-354. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.050>
- Azwa, Z. N., Yousif, B. F., Manalo, A. C., & Karunasena, W. (2013). A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials & Design*. **47**, 424-442. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025>
- Barragán H, B.E., Téllez D, Y.A., Laguna T, A. (2008). Utilización de residuos agroindustriales. *Revista Sistemas Ambientales*. **2(1)**, 44-50. Recuperado en: https://www.researchgate.net/profile/blanca_barragan/publication/310441706_utilizacion_de_residuos_agroindustriales/links/582d2bcb08ae004f74b94c1c/utilizacion-de-residuos-agroindustriales.pdf
- Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in polymer science*. **24(2)**, 221-274. doi: [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5)
- Chandramohan, D., & Marimuthu, K. (2011). A review on natural fibers. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*. **8(2)**, 194-206. Recuperado en: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/33081701/ijrras_8_2_09.pdf
- Cisneros-López, E. O., Pérez-Fonseca, A. A., Fuentes-Talavera, F. J., Anzaldo, J., González-Núñez, R., Rodrigue, D., & Robledo-Ortiz, J. R. (2016). Rotomolded polyethylene-agave fiber composites: Effect of fiber surface treatment on the mechanical properties. *Polymer Engineering & Science*. **56(8)**, 856-865. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.24314>
- Consejo Regulador del mezcal (CRM) (2017). Informe anual 2017. Recuperado de: <http://www.crm.org.mx/informes.html>. Consultado el 10 septiembre 2017.

- Cortés Rodríguez A., Hernández de la Cerna C. (2017). The mezcal, its production and waste treatment. *Revista Alianzas y Tendencias*. 2(8), 10-14. Recuperado de: http://www.ditco.buap.mx/recursos/documentos/revista/anio2_no8_2017/mezcal.pdf
- Cuéllar, A., & Muñoz, I. (2010). Fibra de guadua como refuerzo de matrices poliméricas. *Dyna*. **77(162)**, 137-142. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/19792/1/15843-48985-1-PB.pdf>
- Datoo, M. H. (2012). *Mechanics of fibrous composites*. Springer Science & Business Media. Recuperado de: <https://scholar.google.com.mx/scholar>
- Fairuz, A. M., Sapuan, S. M., Zainudin, E. S., & Jaafar, C. N. A. (2015). Pultrusion process of natural fibre-reinforced polymer composites. In *Manufacturing of natural fibre reinforced polymer composites* (pp. 217-231). Springer, Cham. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07944-8_11
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in polymer science*. **37(11)**, 1552-1596. doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- Fuqua, M. A., Huo, S., & Ulven, C. A. (2012). Natural fiber reinforced composites. *Polymer Reviews*. **52(3)**, 259-320. doi: <https://doi.org/10.1080/15583724.2012.705409>
- González-Sánchez, M. E., Pérez-Fabiel, S., Wong-Villareal, A., Bello-Mendoza, R., & Yañez-Ocampo, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista argentina de microbiología*. **47(3)**, 229-235. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>
- Guerrero, V., Pontón, P., Tamayo, A., Villacís, H., Delgado, F., & Galeas, S. (2013). Materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con fibras naturales y sintéticas. In *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*. **8(1)**, 70-74. Recuperado de: <https://scholar.google.com.mx/scholar>
- Gurunathan, T., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2015). A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. **77**, 1-25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.06.007>
- Hänninen, T., Thygesen, A., Mehmood, S., Madsen, B., & Hughes, M. (2012). Mechanical processing of bast fibres: The occurrence of damage and its effect on fibre structure. *Industrial Crops and Products*. **39**, 7-11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.01.025>
- Hernández, E. P., Parga, M. D. C. C., & Hernández, J. C. G. (2016). Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología*. **18(1)**, 148-164. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552>

- Herrera-Franco, P., & Valadez-Gonzalez, A. (2005). A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*. **36(8)**, 597-608. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.04.001>
- Hidalgo-Reyes, M., Caballero-Caballero, M., Hernández-Gómez, L. H., & Urriolagoitia-Calderón, G. (2015). Chemical and morphological characterization of *Agave angustifolia* bagasse fibers. *Botanical Sciences*. **93(4)**, 807-817. doi: <http://dx.doi.org/10.17129/botsci.250>
- Hoareau, W., Trindade, W. G., Siegmund, B., Castellan, A., & Frollini, E. (2004). Sugar cane bagasse and curaua lignins oxidized by chlorine dioxide and reacted with furfuryl alcohol: characterization and stability. *Polymer Degradation and Stability*. **86(3)**, 567-576. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.07.005>
- Jacques-Hernández, C., Herrera-Pérez, O., & Ramírez-De León, J. A. (2007). El Maguey Mezcalero y la agroindustria del mezcal en Tamaulipas. *En lo ancestral hay futuro: Del tequila, los mezcales y otros agaves*, eds. P. Colunga-GarcíaMarín, L. Eguiarte, A. Larqué, and D. Zizumbo-Villarreal. 287-317. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/236586645>
- Jang, B. Z. (1994). Advanced polymer composites: principles and applications. ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, USA, 1994. 305. Recuperado de: <https://scholar.google.com.mx/scholar>
- John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*. **71(3)**, 343-364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>
- Joshi, S. V., Drzal, L. T., Mohanty, A. K., & Arora, S. (2004). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied science and manufacturing*. **35(3)**, 371-376. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>
- Jurado, P., J. Mutuberría, N. Oliver, R. Charadia, S. Bruhl y N. García (2003). Diseño de un proceso de aprovechamiento integral de residuos agroindustriales. Jornadas SAM/ CONAMET/ Simposio Materia. **17**, 1118-1121. Recuperado de: <https://scholar.google.com.mx/scholar>
- Koronis, G., Silva, A., & Fontul, M. (2013). Green composites: a review of adequate materials for automotive applications. *Composites Part B: Engineering*. **44(1)**, 120-127. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.07.004>
- Kozłowski, R., & Władyka-Przybylak, M. (2008). Flammability and fire resistance of composites reinforced by natural fibers. *Polymers for Advanced Technologies*. **19(6)**, 446-453. doi: <https://doi.org/10.1002/pat.1135>
- Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoo, N., & Trada, M. (2011). A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*. **42(4)**, 856-873. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.010>

- Misri, S., Ishak, M. R., Sapuan, S. M., & Leman, Z. (2015). Filament Winding Process for Kenaf Fibre Reinforced Polymer Composites. In *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*. (pp. 369-383). Springer, Cham. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07944-8_18
- Mitchell, B. S. (2004). An introduction to materials engineering and science for chemical and materials engineers. *John Wiley & Sons*. Recuperado de: <https://books.google.com.mx/books>
- Mohammed, L., Ansari, M. N., Pua, G., Jawaid, M., & Islam, M. S. (2015). A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *International Journal of Polymer Science*. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/243947>
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2002). Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and the Environment*. **10(1-2)**, 19-26. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1021013921916>
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (Eds.). (2005). *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. CRC press. Recuperado de: <https://scholar.google.com.mx/scholar>
- Mulhouse, F., & Newton, I. (2003). Theories and Mechanisms of Adhesion. *Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded*, 53. Recuperado de: <https://books.google.com.mx/books>
- Mylsamy, K., & Rajendran, I. (2011). Influence of alkali treatment and fibre length on mechanical properties of short Agave fibre reinforced epoxy composites. *Materials & Design*. **32(8)**, 4629-4640. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.029>
- Naidu, A. L., Raghuveer, D., & Suman, P. (2013). Studies on characterization and mechanical behavior of banana peel reinforced epoxy composites. *Int J Sci Eng Res*. **4(6)**, 844. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/A_Lakshumu_Naidu/publication/317521465
- Nevell, T. P., & Zeronian, S. H. (1985). Cellulose chemistry and its applications.
- Qaiss, A., Bouhfid, R., & Essabir, H. (2015). Effect of processing conditions on the mechanical and morphological properties of composites reinforced by natural fibres. In *Manufacturing of natural fibre reinforced polymer composites*. (pp. 177-197). Springer, Cham. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07944-8_9
- Reddy, M. S., Reddy, P. V. B., & Yallala, S. (2017). Comparison of Mechanical Properties of Synthetic and Natural Fiber Composites. *International Journal of Engineering Research & Science & Technology*. **6(4)**, 16-34. Recuperado de: https://www.ijerst.com/ijerstadmin/upload/IJEETC_59fae9f6c9061.pdf

- Rodríguez García, I. M. (2006). Caracterización química de fibras de plantas herbáceas utilizadas para la fabricación de pastas de papel de alta calidad. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/11441/70577>
- Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Liu, Y., Yang, G. C., & Zeng, H. M. (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Composites Science and technology*. **61(10)**, 1437-1447. doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00046-X)
- Salazar, M. A. H., Velez, M. F. M., & Cuellar, K. J. Q. (2011). Desempeño mecánico del compuesto polietileno aluminio reforzado con agro fibras largas de fique (Mechanical behavior of polyethylene aluminum composite reinforced with continuous agro fique fibers). *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. 187-194. Recuperado de: <http://www.rlmm.org/ojs/index.php/rlmm/article/view/118>
- Sanjay, M. R., Arpitha, G. R., & Yogesha, B. (2015). Study on mechanical properties of natural-glass fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Materials today: proceedings*. **2(4-5)**, 2959-2967. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.264>
- Sanjay, M. R., Arpitha, G. R., Naik, L. L., Gopalakrishna, K., & Yogesha, B. (2016). Applications of natural fibers and its composites: An overview. *Natural Resources*. **7(03)**, 108. doi: <https://doi.org/10.4236/nr.2016.73011>
- Sanjay, M. R., Madhu, P., Jawaid, M., Senthamarai kannan, P., Senthil, S., & Pradeep, S. (2018). Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*. **172**, 566-581. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.101>
- Sapuan, S. M., & Yusoff, N. B. (2015). The relationship between manufacturing and design for manufacturing in product development of natural fibre composites. In *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites* (pp. 1-15). Springer, Cham. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07944-8_1
- Schultz, J., & Nardin, M. (1999). Theories and mechanisms of adhesion. *Materials engineering-new york*. **14**, 1-26. Recuperado de: <https://books.google.com.mx/books>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación SAGARPA (2017). Agave tequilero y mezcalero mexicano. Planeación Agrícola 2017-2030. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/.../file/.../PotencialAgave_Tequilero_y_Mezcalero.pdf
- Silva-Santos, L., Hernández-Gómez, L. H., Caballero-Caballero, M., & López-Hernández, I. (2009). Tensile Strength of Fibers Extracted from the Leaves of the *angustifolia* Haw Agave in Function of their Length. In *Applied Mechanics and Materials*. **15**, 103-108. Trans Tech Publications. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.15.103>

- Sobczak, L., Lang, R. W., & Haider, A. (2012). Polypropylene composites with natural fibers and wood—General mechanical property profiles. *Composites Science and Technology*. **72**(5), 550-557. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.12.013>
- Srinivas, K., Naidu, A. L., & Raju Bahubalendruni, M. V. A. (2017). A Review on Chemical and Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites. *International Journal of Performability Engineering*. **13**(2). Recuperado de: <http://paris.utdallas.edu/IJPE/Vol13/Issue02/IJPE-2017-02-08.pdf>
- Stokke, D. D., Wu, Q., & Han, G. (2013). *Introduction to wood and natural fiber composites*. John Wiley & Sons.
- Thakur, V. K., & Thakur, M. K. (2014). Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. *Carbohydrate polymers*. **109**, 102-117. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.039>
- Thomas, S., Paul, S. A., Pothan, L. A., & Deepa, B. (2011). Natural fibres: structure, properties and applications. In *Cellulose fibers: bio-and nano-polymer composites* (pp. 3-42). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-17370-7_1
- Ticoalu, A., Aravinthan, T., & Cardona, F. (2010). A review of current development in natural fiber composites for structural and infrastructure applications. In *Proceedings of the Southern Region Engineering Conference (SREC 2010)*. (pp. 113-117). Engineers Australia. Recuperado de: <http://www.usq.edu.au/engsummit>
- Torres-Tello, E. V., Robledo-Ortiz, J. R., González-García, Y., Pérez-Fonseca, A. A., Jasso-Gastinel, C. F., & Mendizábal, E. (2017). Effect of agave fiber content in the thermal and mechanical properties of green composites based on polyhydroxybutyrate or poly (hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate). *Industrial Crops and Products*. **99**, 117-125. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.035>
- Tronc, E., Hernández-Escobar, C. A., Ibarra-Gómez, R., Estrada-Monje, A., Navarrete-Bolanos, J., & Zaragoza-Contreras, E. A. (2007). Blue agave fiber esterification for the reinforcement of thermoplastic composites. *Carbohydrate Polymers*. **67**(2), 245-255. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.05.027>
- Tsoumis, G. (1991). *Science and technology of wood: structure, properties, utilization* (Vol. 115). New York: Van Nostrand Reinhold. Recuperado de: <https://www.trae.dk/wp-content/uploads/2001/10/science-and-technology-of-wood.pdf>
- Uddin, N., & Kalyankar, R. R. (2011). Manufacturing and structural feasibility of natural fiber reinforced polymeric structural insulated panels for panelized construction. *International journal of polymer science*. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2011/963549>

- Valdés-Rodríguez, O. A., Tejero- Andrade, J., Del Valle-Mojica, J. F., Servín-Martínez A., Muñoz- Gamboa, C. (2014). Determinación de las curvas esfuerzo-deformación sobre cargas axiales de una raíz tropical. Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica. Chihuahua, Chih. México. Mem. Electro. **36**, 82-85. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Ofelia_Valdes_Rodriguez/publication/267511738
- Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benítez, J. A., & Hernández-Santiago, C. (2010). Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **14(7)**, 2147-2153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.034>
- Verma, D. (2015). The manufacturing of natural fibre-reinforced composites by resin-transfer molding process. In *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites* (pp. 267-290). Springer International Publishing. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07944-8_13
- Verma, D., & Sharma, S. (2017). Green Biocomposites: A Prospective Utilization in Automobile Industry. In *Green Biocomposites* (pp. 167-191). Springer International Publishing. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49382-4_8
- Wambua, P., Ivens, J., & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: ¿Can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites science and technology*. **63(9)**, 1259-1264. doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00096-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00096-4)
- Xie, Y., Hill, C. A., Xiao, Z., Militz, H., & Mai, C. (2010). Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. **41(7)**, 806-819. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.03.005>
- Zimniewska, M., & Wladyka-Przybylak, M. (2016). Natural fibers for composite applications. In *Fibrous and Textile Materials for Composite Applications* (pp. 171-204). Springer, Singapore. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0234-2_5
- Zimniewska, M., Wladyka-Przybylak, M., & Mankowski, J. (2011). Cellulosic bast fibers, their structure and properties suitable for composite applications. In *Cellulose Fibers: Bio-and Nano-Polymer Composites* (pp. 97-119). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-17370-7_4

CAPÍTULO 3

DESEMPEÑO FÍSICO-MECÁNICO DE UN BIOCOMPUESTO DE MATRIZ EPÓXICA REFORZADO CON FIBRA DE *Agave angustifolia* Haw⁷

PHYSICAL-MECHANICAL PERFORMANCE OF AN EPOXY MATRIX REINFORCED WITH FIBER OF *Agave angustifolia* Haw⁸

Jorge Colin Torres^a, Martín Hidalgo Reyes^b, Marcos Miguel González Peña^c, Artemio Pérez López^d

^{ab}Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 carretera México - Texcoco. Chapingo, Mexico. C.P. 56230. Email: cotogeo@gmail.com, hogladi@hotmail.com

^cProfesor investigador. Departamento de División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 carretera México - Texcoco. Chapingo, Mexico. C.P. 56230. Email: m.gonzalez@correo.chapingo.mx

^dProfesor investigador. Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 carretera México - Texcoco. Chapingo, Mexico. C.P. 56230. Email: aperezl.dia@gmail.com

RESUMEN

En este estudio se desarrollaron biocompuestos de fibra corta de bagazo del *Agave angustifolia* Haw y se evaluó el desempeño físico-mecánico que presenta como refuerzo de una matriz de polímero epóxico de baja viscosidad en un biocompuesto laminar. Primero, se elaboraron paneles de 200x110x3.8 mm³, para probar 12 combinaciones con tres contenidos (18, 24 y 30%) y cuatro longitudes de fibra (1, 3 y 6 mm, y mezcla), y se compararon con los paneles de resina sin fibra. Se realizaron pruebas de tracción paralela y de flexión de tres puntos. Después de seleccionar la mejor combinación, se evaluó el efecto del pretratamiento químico con bicarbonato de sodio, silano e hidróxido de sodio, en la interfaz fibra-matriz para incrementar la resistencia mecánica (tracción, flexión, impacto y dureza) antes y después de la absorción de agua. Mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) se observaron las superficies de fractura de las probetas ensayadas a impacto para conocer el efecto del tratamiento químico sobre las propiedades físico-mecánicas del material. Finalmente se evaluó el efecto que tiene la hibridación en la resistencia a la flexión. Los resultados obtenidos permiten observar una disminución de la resistencia mecánica (tracción, flexión) con la incorporación de fibras, sin embargo, el módulo de elasticidad aumenta en los dos modos de prueba. Los tratamientos químicos tienen un efecto positivo en la resistencia mecánica, sin embargo, tienden a disminuir el módulo de elasticidad. La resistencia al impacto mejora con la incorporación de fibras y con los tratamientos químicos. La hibridación tiene un efecto positivo en las propiedades de flexión del material biocompuesto. El tratamiento con bicarbonato exhibe el mejor comportamiento en todos los ensayos realizados.

Palabras clave: Biocompuestos, residuos agroindustriales, propiedades físico-mecánicas

ABSTRACT

In this study biocomposites of short bagasse fiber from *Agave angustifolia* Haw were developed and physical-mechanical performance was evaluated as a reinforcement of a low viscosity epoxy polymer matrix in a laminar biocomposite. First, panels of 200x110x3.8 mm³ were made, to test 12 combinations with three fiber contents (18, 24 and 30%), and four lengths of reinforcement (1, 3 and 6 mm, and mix), and were compared with the resin panels without fiber in parallel tensile and three point bending tests. After choosing the best combination, the effect of chemical pretreatment with sodium bicarbonate, silane and sodium hydroxide was evaluated at the fiber-matrix interface to increase mechanical strength (tensile, flexural, impact, and hardness) before and after water absorption. By means of Scanning Electron Microscopy (SEM) the fracture surfaces of the specimens tested at impact were observed to know the effect of the chemical treatments on the physical-mechanical properties of the material. Finally, the effect of hybridization on flexural strength was evaluated. The results show a decrease of the mechanical strength (tensile, flexural) with the incorporation of fibers, however, the modulus of elasticity increases in the two test modes. Chemical treatments have a positive effect on mechanical strength, however, tend to decrease the modulus of elasticity. Impact strength improves with the incorporation of fibers and chemical treatments. Hybridization has a positive effect on the flexural properties of the biocomposite material. The bicarbonate treatment exhibits the best performance in all the tests carried out.

Key words: Biocomposites, agroindustrial waste, physical-mechanical properties

⁷ Artículo para enviar a revista científica (Materials and Design)

⁸ Article to send to scientific journal (Materials and Design)

3.2.- Introduccion

El uso de fibras naturales ha tomado mayor importancia a nivel mundial debido, principalmente, a las ventajas que proporcionan para el medio ambiente, ya que constituyen un recurso natural renovable, poseen baja densidad, alta rigidez y capacidad de biodegradarse. Fibras como el sisal, lino, palma, fique, formio, coco, bambú y otras han sido empleadas en el diseño de materiales. La mayoría de estos productos son desechos agroindustriales, lo que los ha convertido en un material atractivo para ser utilizadas como refuerzo en matrices poliméricas, puesto que ofrece varias ventajas, como su abundancia, bajo costo y buenas propiedades mecánicas (Cuéllar y Muñoz, 2010), además de su baja densidad comparada con las fibras sintéticas (Agrawal *et al.*, 2000). Algunos sectores, como el aeroespacial, el automotriz, del mueble y la construcción han mostrado gran interés por los biocompuestos reforzados con fibra natural (Salazar *et al.*, 2011) y en la búsqueda de fibras que puedan reemplazar adecuadamente a las fibras sintéticas, como la fibra de vidrio o combinarlas con éstas para la obtención de materiales compuestos altamente competitivos (Mohanty *et al.*, 2005). Los compuestos de polímeros reforzados con fibra natural se han convertido en un área de investigación muy prometedora puesto que son ambientalmente superiores a los compuestos de fibra de vidrio, la fibra natural tiene un menor impacto ambiental en comparación con la producción de fibra de vidrio (Joshi *et al.*, 2004).

En México, se han realizado investigaciones para el aprovechamiento del bagazo poniendo especial atención en el agave tequilero (*Agave tequilana* Weber) para incluir sus fibras como refuerzo de biocompuestos y mejorar sus características. Torres *et al.*, (2017) estudiaron el efecto del contenido de fibra de los residuos de agave en las propiedades térmicas y mecánicas en matrices de polihidroxibutirato (PHB) y hidroxivalerato P (HB-HV). Los resultados mostraron que la adición de fibra de agave (30% en peso) en ambas matrices aumenta su módulo de tracción por 80 y 50% respectivamente, mientras que para su módulo de flexión el aumento fue de 36 y 41% respectivamente; en lo que respecta a la resistencia al

impacto se obtuvo un aumento significativo en 44 y 66% respectivamente para los biocompuestos que contenían 30% en peso de fibra de agave. Mylsamy y Rajendran (2011) mostraron que el tratamiento con álcali a fibras de *A. tequilana* conlleva a un aumento en las propiedades mecánicas (tensión, compresión, flexión e impacto) de los biocompuestos.

La fibra utilizada en esta investigación proviene del proceso de producción del mezcal que al igual que el tequila, es una bebida alcohólica tradicional de México, la cual es obtenida por procesos artesanales, así como por procesos tecnificados (Hernández *et al.*, 2016). El agave mezcalero ha sido utilizado desde hace aproximadamente 400 años en muchas áreas rurales de México, desde los estados del norte de Tamaulipas y Sonora, hasta Oaxaca en el sur (Aguirre y Eguiarte, 2013). Es un producto de gran importancia agroindustrial que se ha convertido en uno de los productos más representativos de México a nivel internacional, su carácter artesanal y su variedad de presentaciones lo han convertido en una bebida con alta demanda en mercados nacionales y extranjeros, consolidándose como motor de desarrollo económico, especialmente en zonas marginadas, donde mayoritariamente, son pequeños productores los que se dedican a su fabricación (Cortés y Hernández, 2017).

Durante la etapa de molienda de los gajos de maguey se genera el residuo denominado bagazo, del que se generan de 15 a 20 kg en base húmeda por cada litro de mezcal (Jacques *et al.*, 2007). Datos del Consejo Regulador del Mezcal (CRM, 2017) indican que, en 2017, se generaron cerca de 80 mil toneladas de bagazo derivados de la producción de 4 Mm³ de mezcal. Las fibras que se obtienen a partir del bagazo se consideraran desechos, puesto que no hay demanda industrial para ellas, por lo que no tienen costo, repercutiendo en problemas de contaminación debido a que los productores depositan estos residuos directamente al suelo sin ningún proceso previo. Con el fin de lograr un aprovechamiento integral de estas fibras, se han realizado estudios para caracterizar; química, morfológicamente (Hidalgo *et al.*, 2014) y mecánicamente (Silva *et al.*, 2009) las fibras del bagazo de maguey espadín (*Agave angustifolia*

Haw). Estos autores demostraron que las fibras tienen características similares a otras fibras lignocelulósicas y que por ende pueden tener aplicación en diferentes campos, entre ellas los materiales compuestos. Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo desarrollar compuestos de fibra corta de *A. angustifolia*, una de las plantas más utilizadas para la producción de mezcal, y describir el desempeño mecánico que presenta como refuerzo de una matriz de polímero termoestable de baja viscosidad en un biocompuesto laminar, tomando como parámetros críticos: longitud y contenido de fibra, tratamientos químicos y la hibridación con fibra de vidrio para establecer sus posibles aplicaciones.

3.3.- Materiales y métodos

Se utilizó una resina epóxica de baja viscosidad (Resina epóxica N-15) con una densidad es de 1.10 g/cm³ como matriz, suministrada por la empresa Epolyglas, México. Las fibras de *A. angustifolia* fueron suministradas por una planta procesadora de mezcal ubicada en municipio de Santiago Matatlán con coordenadas geográficas: latitud Norte 6°52'00" y longitud Oeste 96°23'00" en el estado de Oaxaca, México. Las propiedades mecánicas y composición química de las fibras son presentadas en el cuadro 1.

Cuadro 1. Propiedades físico-mecánicas del *A. angustifolia*

Mecánicas	RUT* (MPa)	MOE*(GPa)	AR* (%)	Fuente
Hojas	332-421	18-20	1.9-2.4	Silva <i>et al</i> , 2009.
Bagazo	42.6-144	0.56-1.54	0.25-0.62	Cortes, 2009
Químicas (%)	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Fuente
Bagazo	48.04	34.08	20.69	Hidalgo <i>et al.</i> , 2014

*RUT: Resistencia Última a Tensión; MOE: Módulo de elasticidad; AR: Alargamiento

La parte experimental fue dividida en tres partes principales: selección y preparación de las fibras, la elaboración de los biocompuestos y la caracterización de los ejemplares. La figura 1 muestra un diagrama de flujo del procedimiento experimental.

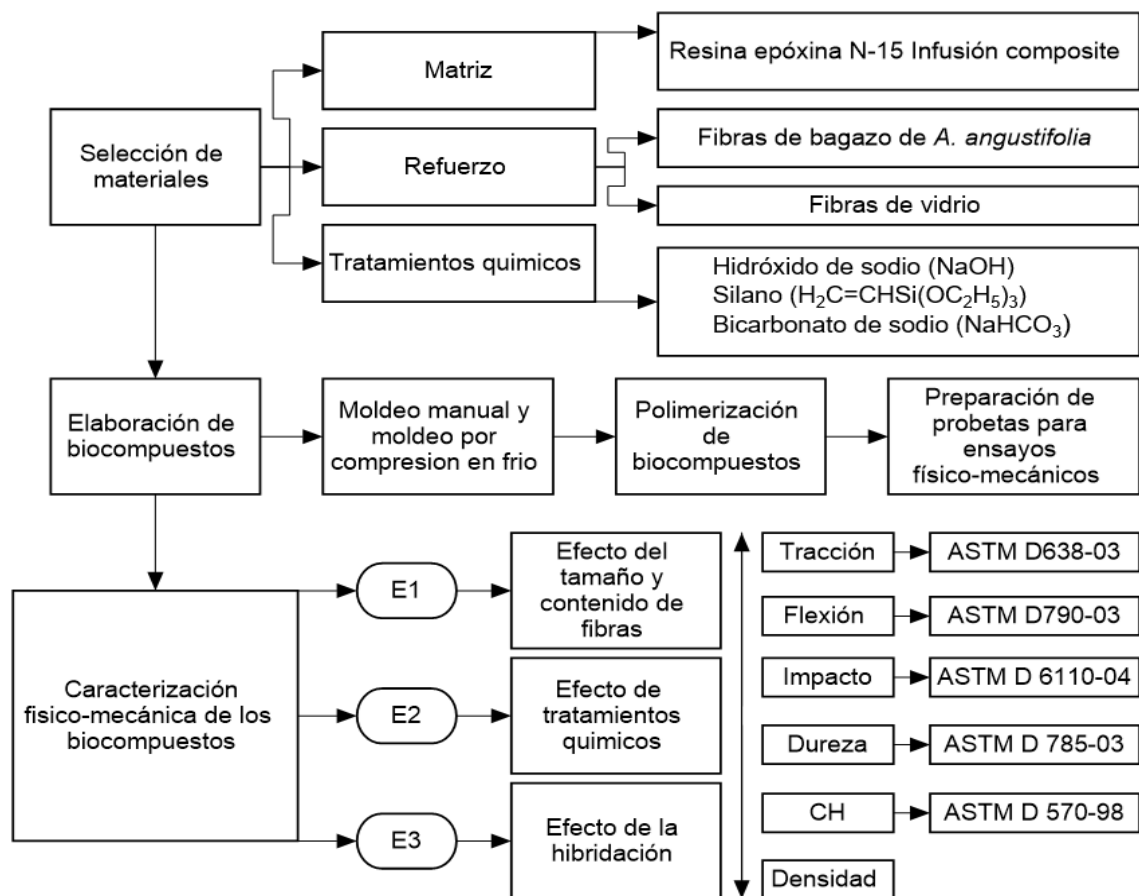


Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento general de obtención y evaluación del desempeño del biocompuesto.

La caracterización de los biocompuestos se dividió en tres experimentos: En el primer experimento se estudió el efecto que tiene el contenido y longitud de la fibra sobre las propiedades mecánicas (tracción y flexión) de biocompuestos de matriz de resina epóxica. Se probaron 12 combinaciones con tres contenidos de fibra (18, 24 y 30%), y cuatro longitudes de fibra (1, 3, 6 mm, y una mezcla de los tres tamaños en partes iguales), y se compararon con los paneles de resina sin fibra.

Una vez establecida la combinación con el mejor desempeño mecánico del panel reforzado con fibra, se evaluó el efecto del tratamiento químico con bicarbonato de sodio, silano, e hidróxido de sodio, en la interfaz fibra-matriz para incrementar la resistencia mecánica y la tenacidad del panel (impacto Charpy) antes y después de ser sumergidos en agua. Los ejemplares fueron sometidos a pruebas de dureza Rockwell, para conocer las posibles diferencias en la resistencia a la

penetración de los biocompuestos. Incluye además un análisis morfológico, mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), para la observación de las superficies de fractura de las probetas ensayadas a impacto para conocer el efecto de los diferentes tratamientos químicos sobre las propiedades mecánicas del material. Finalmente, se determinó la influencia de los tratamientos en la densidad de los ejemplares.

El tercer experimento considera la mejor combinación del primer experimento y en ésta se evaluó el efecto que tiene la hibridación en la resistencia a la flexión. El contenido de fibra de agave en el panel se estableció en 30% y se le agregó el 10, 15, 20, 25 y 30% de fibra de vidrio.

3.3.1.- Preparación de fibras

Se recolectó bagazo de agave y se lavó con abundante agua para eliminar los residuos, tales como pulpa y tierra para quedarse solo con las fibras. Luego las fibras fueron metidas en un secador solar tipo invernadero ubicado en el centro de energías alternativas de la Universidad Autónoma Chapingo durante 36 h a una temperatura oscilatoria de entre 40 y 50°C. Para reducir las fibras, se cortaron primero en una guillotina para cortar papel. Posteriormente, se cortaron en un molino de laboratorio tipo Wiley usando la malla No. 10 (Figura 2a). Finalmente, las fibras se cortaron utilizando tres mallas diferentes; No. 14, 20 y 30 (Figuras 2b, 2c y 2d) fabricadas especialmente para este trabajo.

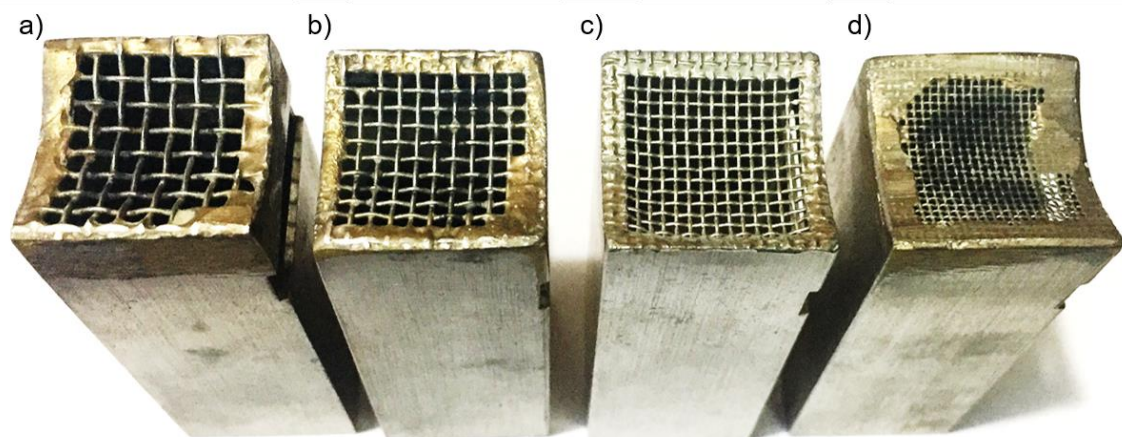


Figura 2. Cribas: a) No. 10, b) No. 14, c) No. 20, y d) No. 30.

Para evitar que las fibras se hicieran masa en el rotor del molino debido a la humedad, se secaron en una estufa a 60 °C por 12 h, antes del cortado con el molino. Las fibras se colocaron durante dos minutos en un equipo vibratorio Fritsch utilizando las cribas No. 30, 40 y 60, para tamizar el producto cortado en el molino Wiley con la malla No. 14, 20 y 30, respectivamente. Las fibras obtenidas se sacaron por última vez durante 12 h a 60°C, con lo cual se obtuvo una humedad de alrededor de 6%.

3.3.2.- Modificación de las fibras

La modificación de las fibras se realizó acorde a trabajos preliminares (Cisneros *et al.*, 2016; Fiore *et al.*, 2018; Rong *et al.*, 2001) con tratamientos con los que obtuvieron mejores resultados. Ellos obtuvieron aumentos importantes en las propiedades mecánicas de compuestos reforzados con fibras naturales tratadas con hidróxido de sodio (NaOH), bicarbonato de sodio (NaHCO₃) y silano (Triethoxy Vinil Silano), respectivamente. En esta investigación cada tratamiento químico se llevó a cabo en una solución con una relación disolvente-fibra de 10:1 en peso con agitación moderada de la mezcla en un agitador magnético VWR. Al final de los tratamientos, las fibras se enjuagaron varias veces con agua dulce para eliminar los reactivos residuales y se recuperaron por filtración por vacío hasta que la solución de lavado fue neutra.

3.3.2.1.- Tratamiento alcalino (NaOH)

La mercerización de las fibras de agave se realizó durante 24 h en una solución al 5% de NaOH a temperatura ambiente. El tratamiento alcalino también se usó como pretratamiento para todos los tratamientos posteriores. Para hacerlo, las fibras se colocaron durante 15 minutos en NaOH al 2% a temperatura ambiente, con el fin de activar los grupos hidroxilo en la fibra.

3.3.2.2.- Tratamiento con silano

Este tratamiento se realizó disolviendo el silano al 5% en peso en una mezcla de etanol- agua con una relación 95: 5 en peso. Para asegurar la hidrólisis completa del silano, la solución se agitó durante 1 hora, y se usó ácido acético para mantener el valor de pH entre 3,5 y 4. Las fibras se sumergieron en la solución

durante 90 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente, la reacción entre grupos hidroxilo de fibra de *A. angustifolia* y silanos se indujo en un horno a 100°C durante 30 minutos.

3.3.2.3.- Tratamiento con bicarbonato de sodio NaHCO_3

Las fibras de agave se sumergieron durante 120 h en una solución al 10% de NaHCO_3 a temperatura ambiente.

3.3.3.- Elaboración de los paneles del material compuesto

Se elaboraron paneles de 110 mm de ancho x 200 mm de largo x 3 mm de espesor. Se utilizó una combinación de técnicas de moldeo; hand lay up y moldeo por compresión en frío. La matriz se preparó a partir de la resina epóxica para infusión y su catalizador en una relación de peso de 10:1. El catalizador se añadió a la resina y se mezcló hasta obtener una sustancia homogénea. Se agregó el porcentaje de fibra de agave requerido y se mezcló hasta que las fibras se mojaron completamente, la mezcla se vertió en el molde previamente recubierto con cera desmoldante. El molde se cubrió con una placa de acero también cubierta de cera desmoldante para facilitar su extracción y un buen acabado de la superficie del material. Se aplicó una carga de 20 kg para simular el prensado del panel y se dejó curar durante 24 h a temperatura ambiente. En la figura 3 se muestra un esquema del mecanismo que se usó para fabricar las placas del material biocompuesto. Finalmente, el panel se metió en un horno a 45°C durante 4 h para garantizar la polimerización del material.

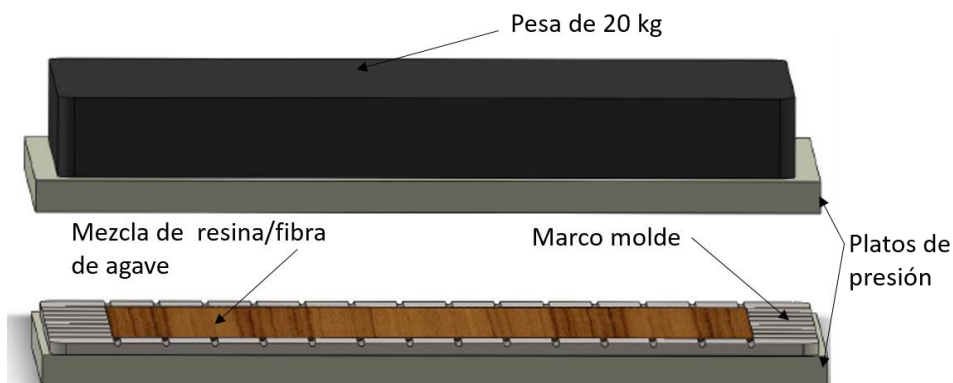


Figura 3. Esquema del mecanismo para la elaboración de paneles

Las placas moldeadas fueron cortadas en tiras rectangulares para obtener las probetas para cada uno de los ensayos mecánicos según la norma ASTM correspondiente. Se empleó una sierra radial OMGA 500 para obtener las probetas de forma rectangular de $85 \times 15 \times 3.8 \text{ mm}^3$ para el ensayo a flexión y de $127 \times 8 \times 3.8 \text{ mm}^3$ para el ensayo a impacto. Para la elaboración de probetas para el ensayo a tracción las placas fueron cortadas en tiras de $175 \times 19 \times 3.8 \text{ mm}^3$ posteriormente se maquinaron en un equipo de control numérico computarizado (CNC) para obtener probetas del tipo I (Figura 4). Todas las probetas fueron desbastadas con una lija de agua del 240 para eliminar las rebabas de las partes maquinadas.

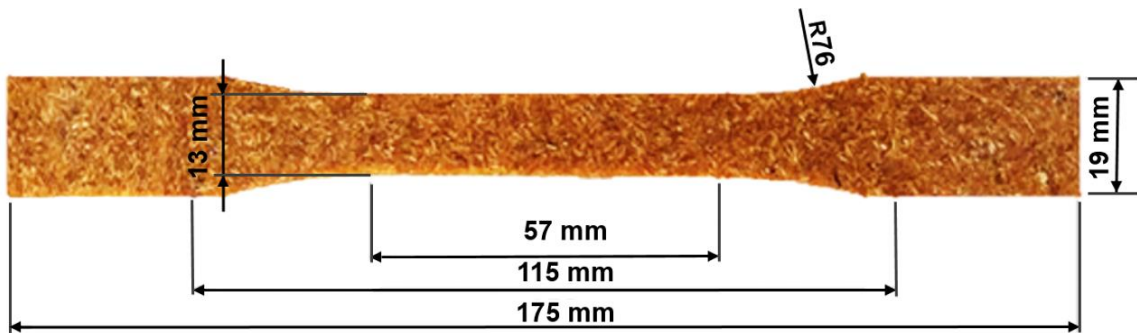


Figura 4. Probetas tipo I para ensayos de tracción

3.3.4.- Caracterización físico- mecánica del biocompuesto

La caracterización de los materiales comprende todas las técnicas utilizadas con el fin de determinar propiedades mecánicas y físicas. Para el caso de las propiedades mecánicas se utilizó una máquina de ensayos universales marca INSTRON modelo 3282 equipada con una celda de carga de 100 kN, 500 W de potencia y software de carga digital, la cual permite determinar propiedades mecánicas utilizando probetas adecuadas para pruebas de tracción y flexión a 3 puntos. La resistencia de impacto Charpy de las muestras se midió utilizando una máquina de impacto marca INSTRON modelo CEAST 9050 equipada un martillo Charpy ASTM 7600-101 de 1 J. Para obtener la dureza Rockwell de la superficie del material se utilizó un durómetro Mitutoyo ARK con indentador de bola de un $\frac{1}{4}$ de pulgada. El cuadro 2 muestra los ensayos realizados a los biocompuestos,

con información de las normas utilizadas, las dimensiones de las muestras, el número de muestras ensayadas y los parámetros de ensayo de cada prueba.

Cuadro 2. Ensayos realizados a los biocompuestos

	Ensayo	Norma	Trat.	Rep.	Total	Dimensiones	Parámetros de ensayo
E 1	Tracción	ASTM D638-03	13	6	78	Tipo I	3.85 mm/min, 23°C
	Flexión	ASTM D790-03	13	8	104	85x15x3.8mm ³	1.85 mm/min, 23°C
E 2	Tracción	ASTM D638-03	4	8	32	Tipo I	3.85 mm/min, 23°C
	Flexión	ASTM D790-03	4	10	40	85x15x3.8mm ³	1.85 mm/min, 23°C
	Impacto	ASTM D6110-04	5x2	10x2	100	127x8x3.8mm ³	3.4m/s, 23°C
	Dureza	ASTM D785-08	5	8	32	2x2x2mm ³	23°C
	Absorción	ASTM D570-98	4	10	40	85x15x3.8mm ³	960 h, 22°C
	Densidad	-	5	10	50	85x15x3.8mm ³	Método geométrico
	Análisis de fractura	-	4	5	20	3x3.8x0.5mm ³	15 kV, 23°C
E 3	Flexión	ASTM D 790-03	5	10	50	85x15x3.8mm ³	1.85 mm/min 23°C

3.3.5.- Análisis estadístico

Las propiedades físico-mecánicas del biocompuesto se analizaron con un diseño completamente aleatorizado. Se compararon las magnitudes de resistencia a tensión, flexión, impacto, dureza, módulo de elasticidad, densidad y resistencia a la humedad para cada tratamiento. El primer experimento se realizó con un arreglo factorial 4x3 (factor 1: contenido, con cuatro porcentajes de fibra y factor 2: Longitud, con tres tamaños de fibra). El segundo experimento se realizó con un factor de estudio (tratamientos químicos) con tres tratamientos diferentes. Finalmente, el tercer experimento se realizó también con un factor de estudio (hibridación) con cinco porcentajes de fibras de vidrio.

Los resultados fueron examinados a partir del análisis de varianza. La prueba F fue utilizada para determinar el efecto significativo de cada tratamiento, para identificar diferencias significativas entre las medias, se utilizó la prueba de Tukey. El análisis estadístico fue realizado con el programa estadístico SAS (Statistical Analysis System) en la versión 9.0 para Windows.

3.4.- Resultados y discusión

3.4.1.- Acondicionamiento de las fibras

La figura 5 muestra el histograma de la frecuencia relativa de las longitudes de fibra obtenidas para el presente estudio. Las longitudes de las fibras que se cortaron con la malla No. 14 y se tamizaron en la criba No. 30 muestran un tamaño promedio de 6 mm. Las que cortaron en la malla No. 20 y se tamizaron en la criba No. 40, en promedio mostraron una longitud de 3 mm. Finalmente, las fibras que se cortaron con la malla No. 30 y se tamizaron en la criba No. 60 mostraron una longitud de 1 mm.

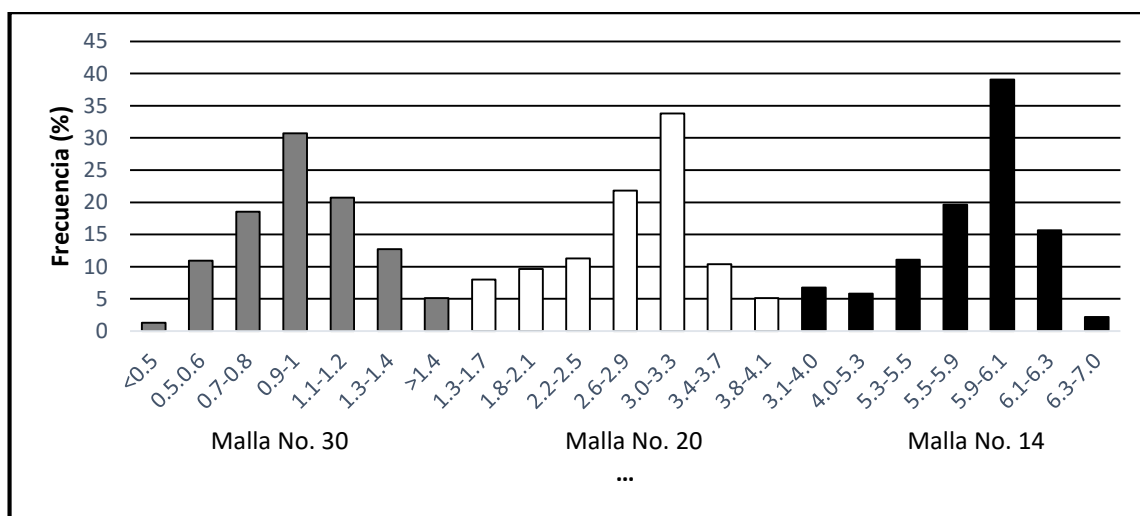


Figura 5. Histogramas de longitudes de fibras de *A. angustifolia*

3.4.2.- Efecto del contenido y la longitud de fibra en las propiedades mecánicas del biocompuesto.

En el cuadro 3 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) multifactorial donde se indica el efecto significativo del contenido y el tamaño de las fibras en el

biocompuesto. Del cuadro se deduce que el tamaño y el contenido, así como su interacción influyen en las propiedades mecánicas del biocompuesto. De manera general, se aprecia que el contenido de fibra disminuye la resistencia a tracción y flexión del biocompuesto. Sin embargo, el módulo de elasticidad aumenta con el contenido de fibra. El tamaño de la fibra tiene un efecto en las propiedades mecánicas de los biocompuestos. Sin embargo, no hay una tendencia clara del efecto.

Cuadro 3. Análisis multifactorial para los factores; longitud (A) contenido de fibras (B) para las variables RUT, MOT, MOR y MOF.

FACTOR	RUT (MPa)	MOT (GPa)	MOR (MPa)	MOF (GPa)
Longitud (A)				
1mm	26.5592a	3.7833a	40.061a	3.49768b
3mm	25.9596a	3.9155a	36.947ab	3.65691ab
6mm	22.5934b	3.7758a	34.671b	3.75050a
Mezcla	25.4594a	3.8344a	34.166b	3.61082ab
Contenido (B)				
RP	36.0011	3.1812	61.264	2.92664
18%	26.9057a	3.7336a	38.524a	3.481968b
24%	24.4516b	3.7706a	37.314a	3.57741b
30%	24.0714b	3.9776b	33.546b	3.91968a
A	***	Ns	***	**
B	***	*	***	***
A*B	**	***	Ns	***

***, **, *, Ns. Significativo estadísticamente a $p < 0.001$, Significativo estadísticamente a $p < 0.01$, Significativo estadísticamente a $p < 0.05$ y No significativo respectivamente. Letras diferentes entre niveles de cada factor indica diferencia estadísticamente significativa.

En el cuadro 4 se muestra los resultados de la prueba Tukey para la diferencia entre las medias de los tratamientos. El análisis se realizó con un valor crítico del rango estudentizado de 4.86323 y 4.81183 y una diferencia significativa mínima (DSM) de 7.0231 y 10.781 para las resistencias de tracción y de flexión, respectivamente. Para los módulos a tracción y flexión se realizó el análisis con

un valor crítico del rango estudentizado de 4.86323 y 4.81183 y una diferencia significativa mínima (DSM) de 0.8316 y 0.433, respectivamente.

Cuadro 4. Comparación de medias de tratamientos mediante la prueba Tukey

Tratamientos	Variables			
	RUT (MPa)	MOE (GPa)	MOR (MPa)	MOE (GPa)
RP	36.001a	3.1812c	61.264a	2.9266d
1mm18	30.542ab	3.7559abc	42.259b	3.6692abc
1mm24	25.411bc	4.1374ab	42.132b	3.4351c
1mm30	22.988c	3.4565bc	35.792bc	3.3888c
3mm18	25.749bc	3.7118abc	35.555bc	3.3622c
3mm24	24.656bc	3.4769bc	35.719bc	3.5480c
3mm30	26.845bc	4.4970a	31.223c	4.0605a
6mm18	23.049c	3.7134abc	38.795bc	3.5729bc
6mm24	23.285c	3.4769bc	37.575bc	3.7385abc
6mm30	21.087c	4.1371ab	34.471bc	3.9402ab
Mmm18	25.893bc	3.7533abc	37.485bc	3.3551cd
Mmm24	24.455bc	3.9302abc	33.831bc	3.5881bc
Mmm30	25.366bc	3.8197abc	32.6963bc	3.8893bc

La resistencia mecánica en la prueba de tracción paralela disminuye con la incorporación de fibras de agave; sin embargo, el valor más alto se obtuvo con la configuración, 1mm18. Las demás configuraciones no muestran diferencia estadísticamente significativa. La resistencia a la tracción resulta ser 30.5 MPa frente a 36 MPa de la matriz de resina epóxica. De forma similar, la resistencia a la flexión en tres puntos disminuye al incorporar las fibras al compuesto, en todos los tratamientos. Los valores más altos los presentaron las configuraciones 1mm18 y 1mm24 con 42 MPa en promedio frente a los 61.26 MPa de la matriz sola. Resultados similares son reportados por Yan *et al.*, (2012), ellos encontraron que la adición de tejido de bambú provoca una disminución de la resistencia a la tracción de aproximadamente el 26.4% en comparación con la resina epóxica pura. Este comportamiento es atribuido a la naturaleza hidrofílica

de las fibras que afecta negativamente su adhesión a matrices poliméricas hidrofóbicas (Corrales *et al.*, 2007).

En general se observa que la RUT y el MOR disminuyen con la incorporación de fibras, sin embargo, en lo que se refiere a la rigidez, en la prueba de tracción, se encontró que la incorporación de la fibra promueve un incremento en el módulo de elasticidad del panel. Este incremento es apreciable con contenidos y tamaños de fibra altos. Para la configuración 3mm30 se obtuvo un módulo de elasticidad de 4.5 GPa, significativamente superior a los 3.2 GPa de la lámina fabricada con la resina epóxica pura. Un resultado análogo se encontró en la prueba de flexión a tres puntos, 4.06 GPa para biocompuesto con la configuración 3mm30 frente a 2.93 GPa de la resina pura. La mejora del módulo de elasticidad se debe a la incorporación de una fase rígida (fibra) en la matriz (Tronc *et al.*, 2007). Cisneros *et al.*, (2016) y Yan *et al.*, (2012) obtuvieron resultados similares. Mylsamy y Rajendran (2011) encontraron que el mejor equilibrio en las propiedades mecánicas con fibras de *Agave americana* se obtenía con un tamaño de 3 mm y una relación de peso fibra: resina de 3:7. Las figuras 6 y 7 muestran el comportamiento mecánico descrito anteriormente.

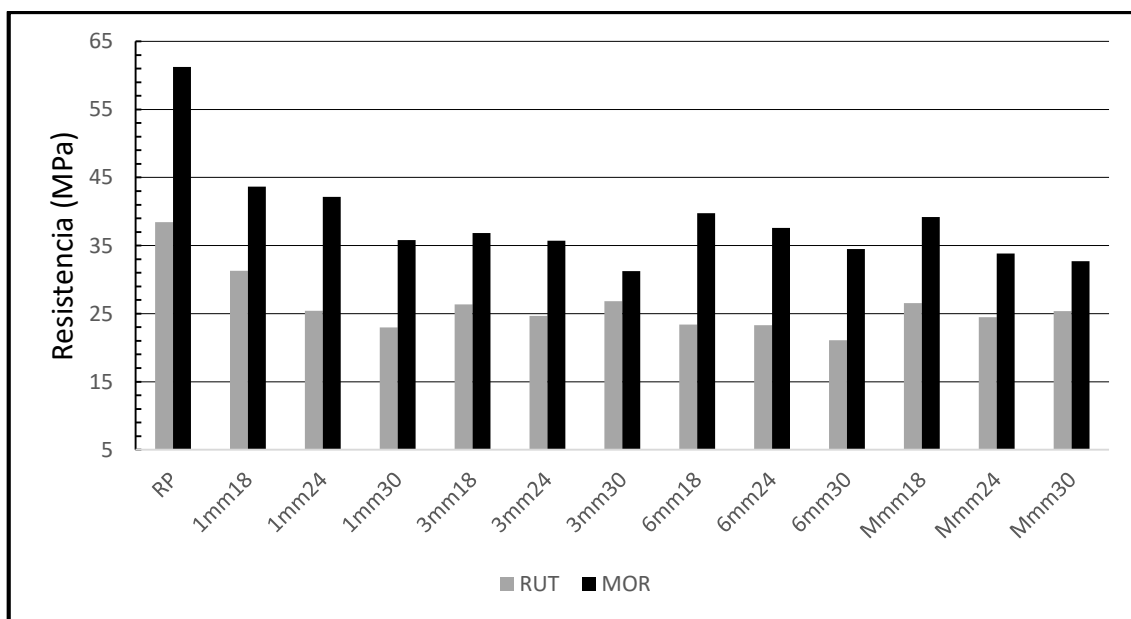


Figura 6. Resistencia mecánica de biocompuestos de resina epóxica reforzados con fibras de *A. angustifolia*: RUT, resistencia última a la tracción y MOR, resistencia a la flexión.

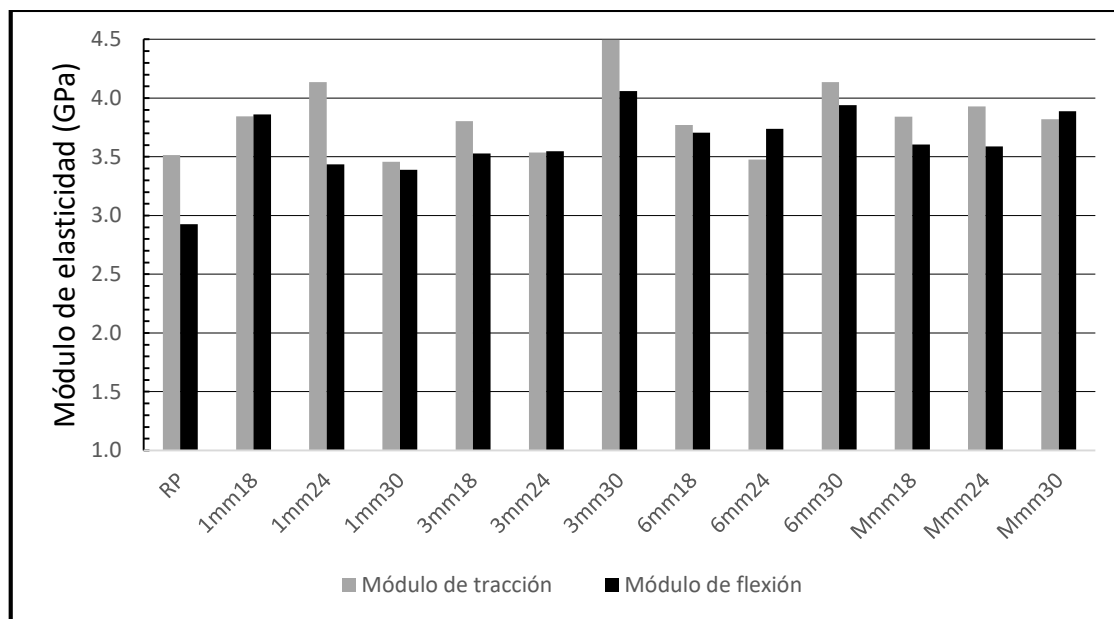


Figura 7. Módulo de elasticidad biocompuestos de resina epóxica reforzados con fibras de *A. angustifolia*

3.4.3.- Efecto del tratamiento químico en las propiedades mecánicas del biocompuesto.

3.4.3.1.- Propiedades de tracción

La figura 8 muestra las propiedades de tracción de los biocompuestos reforzados con fibras tratadas químicamente. Todos los materiales reforzados con fibra tratada muestran un ligero aumento en la resistencia a la tracción comparados con el de fibra sin tratar, lo que indica una mejora en la unión interfacial entre la fibra y la matriz. En particular el tratamiento FBIC (fibra tratada con bicarbonato de sodio) presenta un aumento del 6%, sin embargo, comparado con la RP sigue siendo bajo. A pesar del efecto positivo que tienen los tratamientos químicos en la resistencia a tracción, el uso de estos implica efectos perjudiciales sobre el módulo de tracción es decir muestran un módulo de tracción 34.3% más bajo que FST (fibra sin tratar) y 14.7% más bajo que RP. Este comportamiento puede atribuirse a que el mecanismo de adhesión otorgó un perfil dúctil a la interfaz fibra-matriz (Balasuriya *et al.*, 2002)

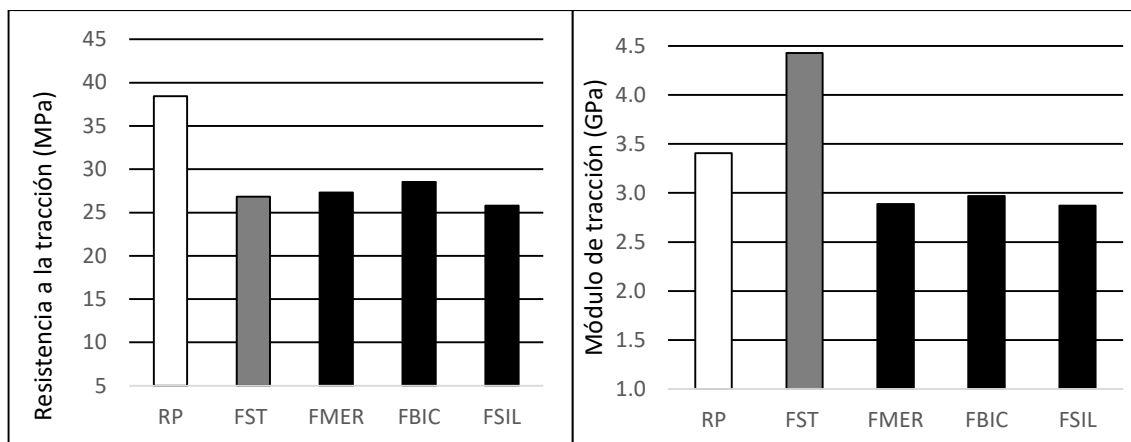


Figura 8. Efecto del tratamiento químico en la resistencia y módulo de tracción

3.4.3.2.- Propiedades de flexión

Las propiedades de flexión de los biocompuestos se muestran en la figura 9. Los resultados son similares a los de la prueba de tracción. Todos los materiales reforzados con fibra tratada muestran un ligero aumento en la resistencia a la flexión comparados con el de fibra FST. En particular el tratamiento FBIC presenta un aumento del 24%, sin embargo, frente a la RP sigue siendo bajo. Presenta un módulo de flexión 34.7% más bajo que FST y 9.3% más bajo RP.

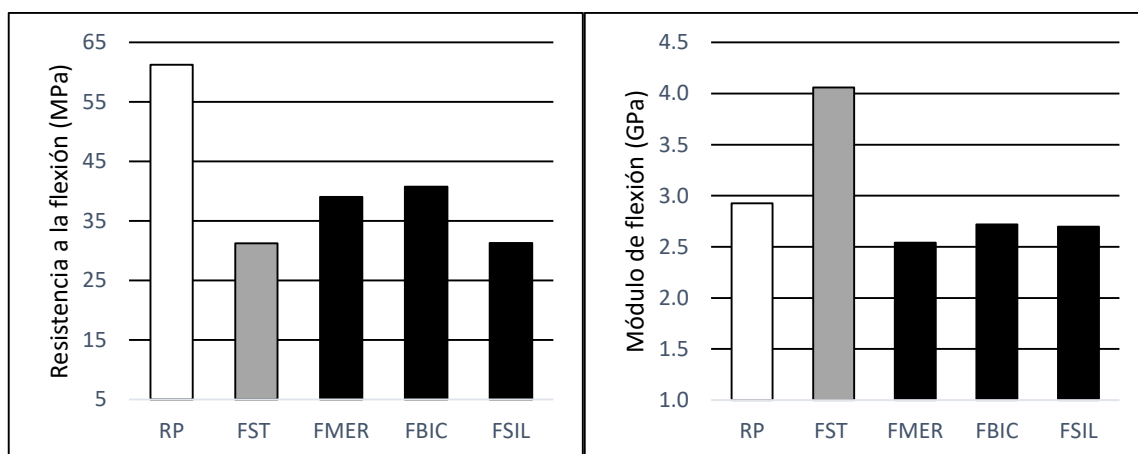


Figura 9. Efecto del tratamiento químico en la resistencia y módulo de flexión

3.4.3.3.- Resistencia al impacto

Los resultados de la resistencia al impacto se muestran en la figura 10. Se encontró que la resistencia aumento en un 2% para el biocompuesto FST en

comparación con el RP. Se encontraron incrementos importantes de la resistencia al impacto en biocompuestos de fibra tratada. El biocompuesto FBIC mostró aumentos hasta de un 36% con respecto a el FST y hasta de un 38% en comparación con el RP. Rout *et al.*, (2001) encontraron un aumento de 60% en la resistencia al impacto de compuestos de poliéster reforzados con fibra de coco tratada con NaOH. Este comportamiento podría estar relacionado con el tratamiento químico de las fibras que proporciona una mejor distribución de las fibras y una mejor adhesión de la fibra a la matriz que controla la resistencia de los materiales.

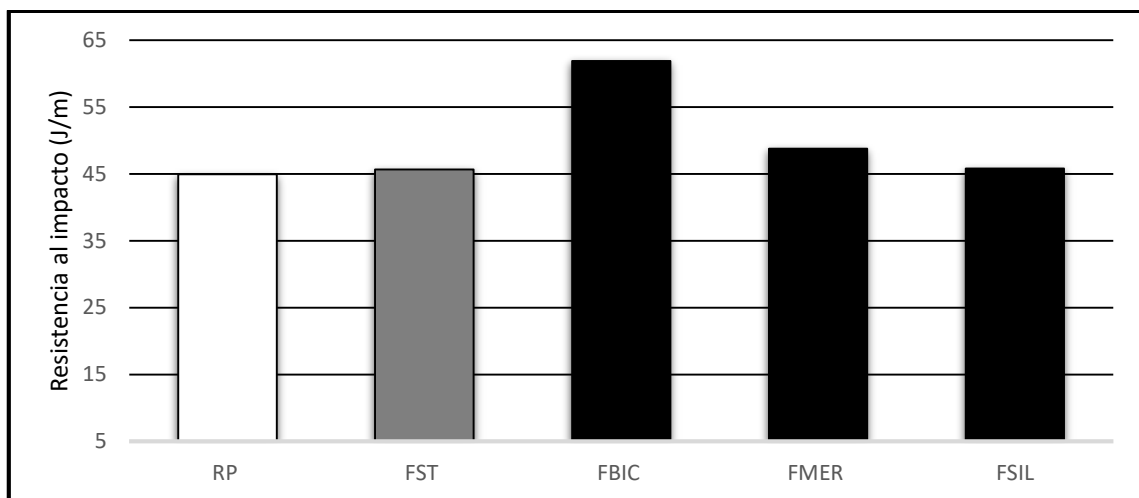


Figura 10. Efecto del tratamiento químico en la resistencia al impacto

3.4.3.4.- Análisis de fractura mediante SEM

Con el fin de visualizar más a fondo el comportamiento de la interfaz entre la matriz y la fibra tratada con los diferentes agentes químicos, las probetas ensayadas a impacto fueron llevadas a un microscopio electrónico de barrido (SEM). Las fractografías de las muestras probadas a impacto se muestran en la figura 11. El arranque de fibras debido a una baja unión interfacial entre la fibra y la matriz y la presencia de huecos debido al proceso de fabricación de los compuestos, se observaron como el modo primario de fractura por impacto.

Las figuras 11a y 11b muestran la fractografía de impacto de los biocompuestos FST y FSIL, exhibieron un modo de falla que comprende tanto fibras extraídas como pocas roturas de fibras y presencia de huecos, lo que indica una adhesión

interfacial pobre entre la fibra y la matriz. Además, el biocompuesto FSIL exhibió signos de propagación de grietas en el extremo de la interfaz matriz-fibra. La figura 11d muestra el modo de fractura de los biocompuestos de FBIC, se observa ligeramente un mayor número de roturas de fibras que en el FMER (Figura 11c) además de poca presencia de huecos lo que indica una mejor interacción en la interfaz fibra-matriz y mejor distribución de las fibras. Chaitanya y Singh (2017) y Chaitanya y Singh (2016) informaron observaciones similares para biocompuestos de fibras de sisal tratadas con bicarbonato de sodio y fibras tratadas con NaOH, respectivamente, así como Cisneros *et al* (2016) y Tronc *et al* (2007) para materiales biocompuestos reforzados con fibras tratadas con MAPE y fibras estratificadas.

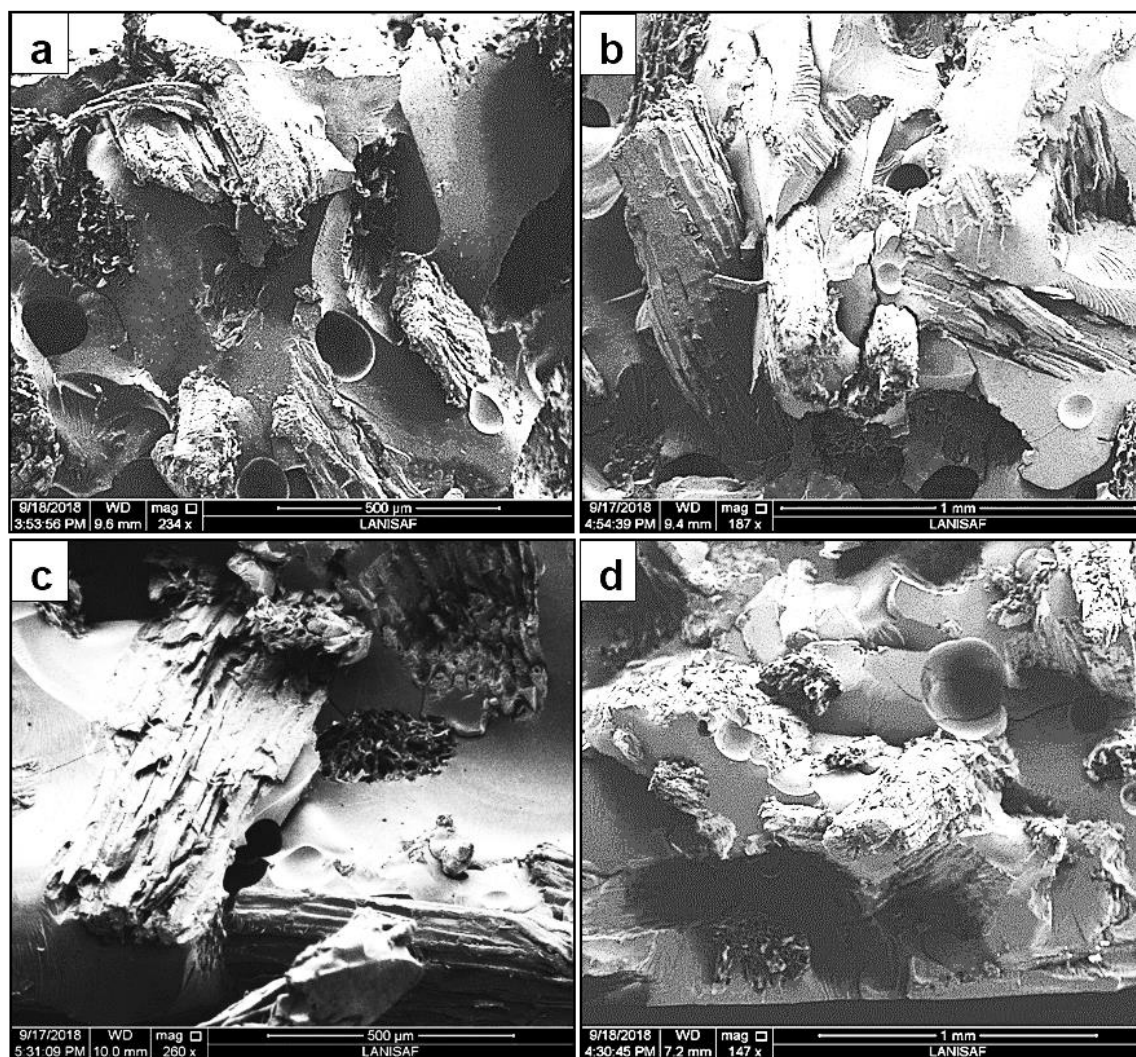


Figura 11. Fractografías SEM; a) FST, b) FSIL, c) FMER y d) FBIC

3.4.4. - Efecto del tratamiento químico en las propiedades físicas del biocompuesto.

3.4.4.1.- Dureza y densidad

En la figura 12a se muestran los resultados obtenidos en la prueba de dureza Rockwell para cada uno de los tratamientos y se compara con los valores obtenidos de la RP. Se observa que con la incorporación de fibras tratadas la dureza aumenta significativamente en comparación con los compuestos de FST. El tratamiento FBIC muestra un aumento del 46.4%, FMER del 34.7% y FSIL de 16.7% en comparación con FST. Estos aumentos en la dureza se deben a la afinidad mejorada entre fibra y matriz debido al tratamiento químico que permite una mejor distribución de las fibras y disminuye la formación de huecos y defectos en el material (Cisneros *et al.*, 2016). Wang *et al* (2007) encontraron aumentos del 16% en la dureza de compuestos de matriz de polietileno de alta densidad (HDPE) reforzados con fibras tratadas con peróxido de dicumilo.

Según la literatura (Mahfoudh *et al.*, 2013) el buen contacto entre la fibra y la matriz, debido al tratamiento químico, produce una reducción en los huecos y defectos, lo que debería aumentar la densidad de los biocompuestos. Sin embargo, como se observa en la figura 12b la incorporación de fibras tratadas en un material biocompuesto disminuye la densidad. Este efecto puede atribuirse al tratamiento superficial de la fibra que cambia sus propiedades (Cisneros *et al.*, 2016; Fiore *et al.*, 2016) y ocasiona que se obtengan materiales más ligeros. El tratamiento con bicarbonato de sodio elimina una cierta porción de hemicelulosa, lignina y sustancias cerasas que cubren la superficie externa de la fibra (Fiore *et al.*, 2016). El tratamiento FBIC muestra una reducción en la densidad del 11% comparado con FST y del 17% frente a RP.

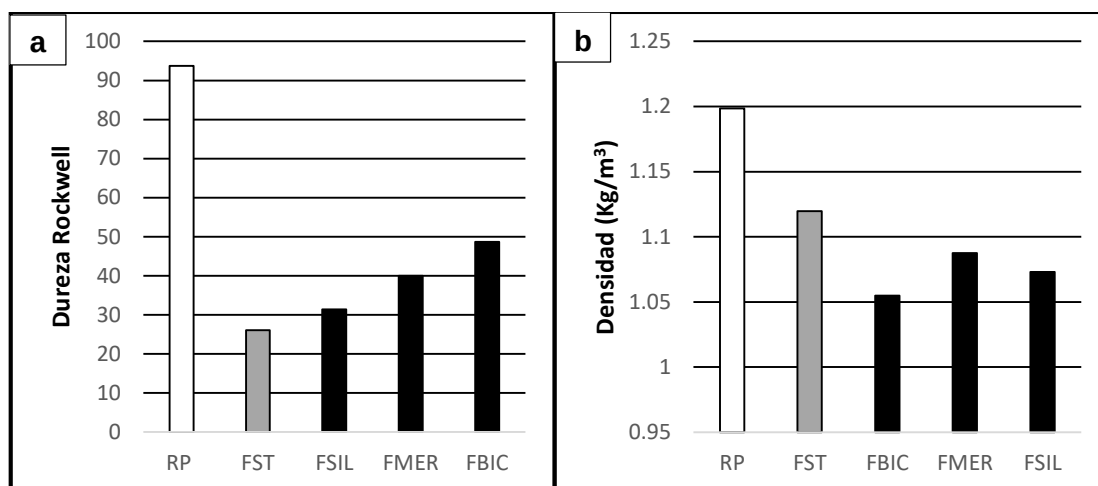


Figura 12. Efecto del tratamiento químico en la dureza y densidad del biocompuesto

3.4.4.2.- Contenido de humedad.

El porcentaje de absorción de humedad de los biocompuestos de matriz epóxica reforzados con fibra de bagazo de agave se evaluó como la diferencia entre el peso seco y el peso húmedo de las muestras. La figura 13 muestra el porcentaje de ganancia de peso en función del tiempo para las muestras de biocompuestos reforzados con fibra tratada (FMER, FBIC y FSIL) y no tratada (FST). Se observa que el contenido de humedad en la mayoría de los compuestos con fibra tratada es mayor que los de FST. El mayor porcentaje de ganancia lo presentan los biocompuestos de FSIL y FBIC que muestra un aumento del 6.5% y 11% respectivamente más que FST. Este comportamiento puede atribuirse a la eliminación de sustancias extractivas y ceras durante el tratamiento (Pérez *et al.*, 2014). Estos resultados son similares a los reportados por Cisneros *et al.*, (2016) con fibras de *Agave tequilana* Weber tratadas con silano y Alix *et al.*, (2011) con fibras de lino tratadas con silano. Las fibras tratadas presentaron un aumento en el contenido de humedad del 3 y 8% respectivamente.

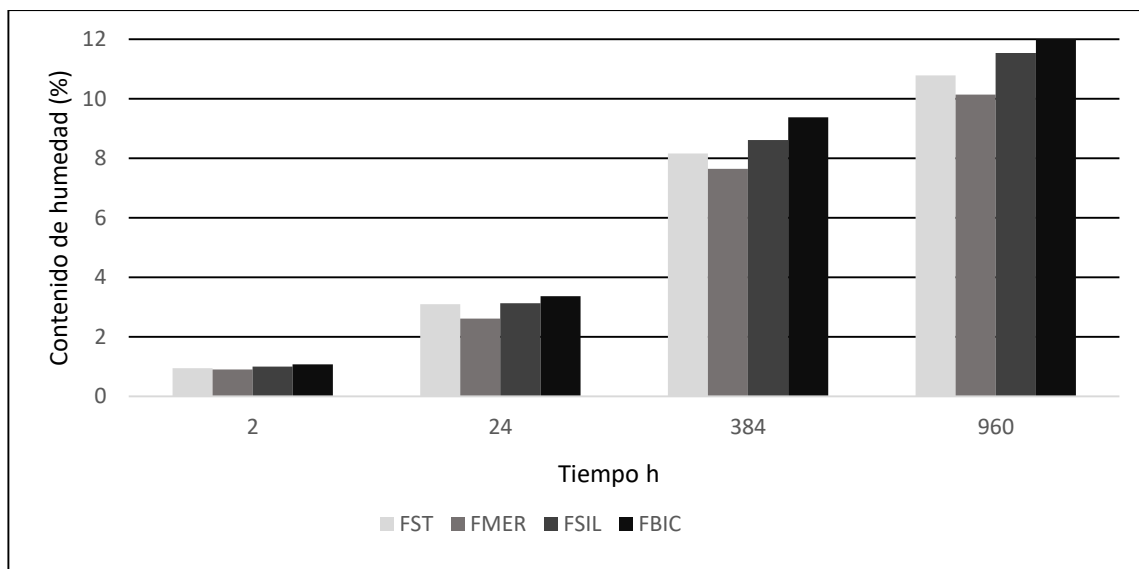


Figura 13. Efecto del tratamiento químico en la absorción de humedad del biocompuesto

En el caso de tratamiento superficial del FMER se observó, desde las 2 h de inmersión en agua dulce, una ganancia menor de peso que FST. Esta tendencia se observó hasta las 960 h de inmersión obteniendo 6% menos absorción de agua que FST, lo que significa que con este tratamiento la resistencia a la humedad aumento. Con este análisis se puede deducir que el tratamiento con FMER dio como resultado mejor compatibilidad entre la fibra y la matriz haciendo al material más hidrófobo que incrementa la resistencia a la humedad e implementa mayores aplicaciones para el material (Zhang *et al.*, 2013).

3.3.4.3.- Efecto del contenido de humedad en las propiedades mecánicas del biocompuesto.

Los resultados de la resistencia a la tracción, resistencia a la flexión y resistencia al impacto de los biocompuestos reforzados con fibra de agave en seco y después de sumergidos en agua se muestran en las figuras 14a, 14b y 14c respetivamente. Se puede observar claramente una disminución de las propiedades mecánicas en todos los tratamientos, sin embargo, el tratamiento con FBIC es el que presenta una mayor reducción en todas las propiedades del 47, 50 y 27% en cada una de las pruebas respectivamente. El deterioro de las propiedades mecánicas se debe a una transferencia de tensión insuficiente en todos los materiales compuestos debido a la degradación de las interfaces entre

la fibra y la matriz (Graupner *et al.*, 2009) que se ven afectados por la inmersión de las muestras en agua dulce (Alomayri *et al.*, 2014), lo que en efecto disminuye la interacción de la interfaz fibra-matriz (JA *et al.*, 2007).

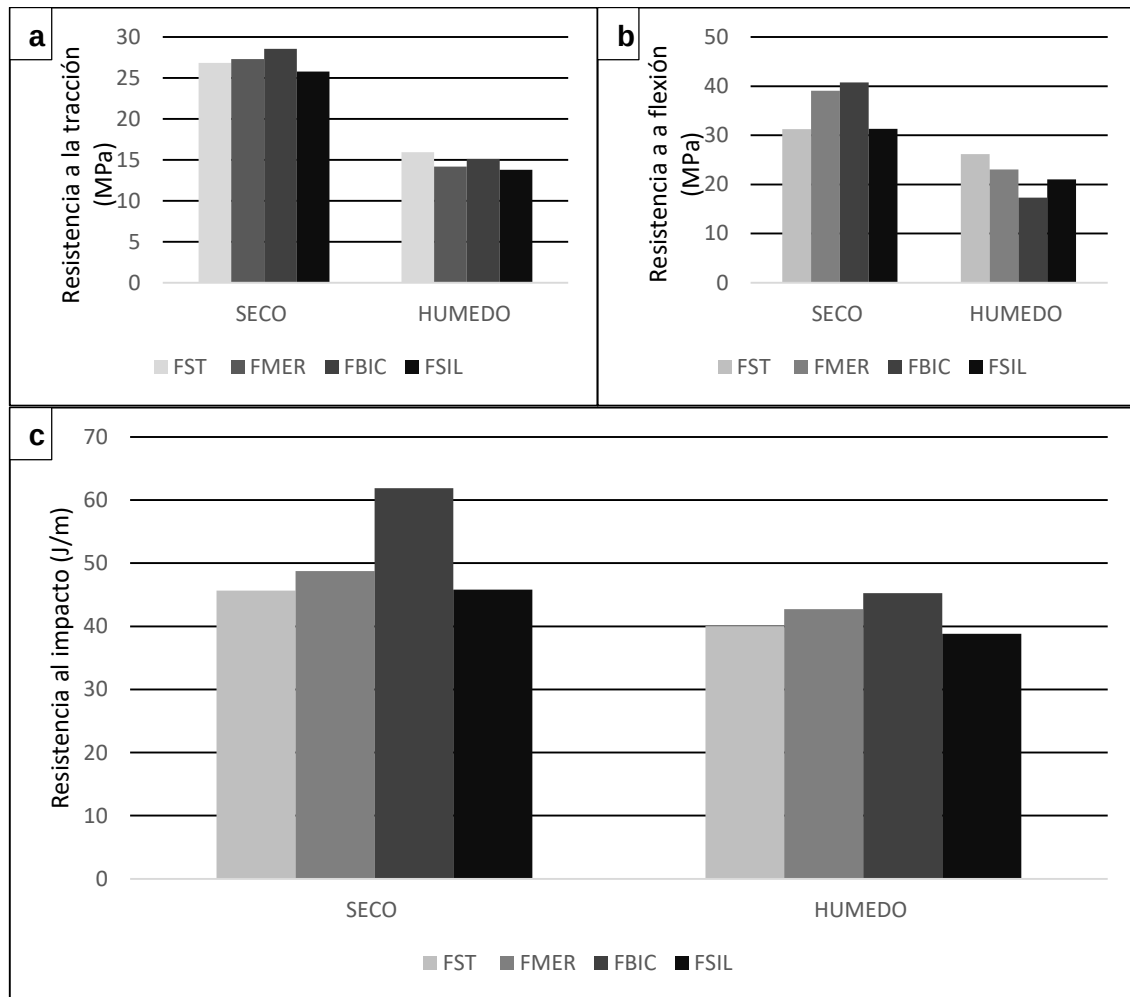


Figura 14. Efecto del tratamiento químico en las propiedades mecánicas del biocompuesto después de la absorción de agua

3.4.5.- Efecto de la hibridación en las propiedades de flexión del biocompuesto.

En los últimos años, se han desarrollado compuestos con agentes de refuerzo de más de un tipo y forma para compensar sus deficiencias, lo que dio como resultado un efecto híbrido positivo (Kwon *et al.*, 2014) puesto que dos tipos de fibras que tienen diferentes características ofrecen ventajas sobre su uso individual en una matriz polimérica. Se han realizado estudios sobre la hibridación utilizando combinaciones de fibras naturales con fibras de vidrio (Jawaid y Khalil,

2011) para obtener materiales con propiedades mecánicas ligeramente más bajas que utilizando sólo fibras de vidrio, pero lográndose materiales compuestos con menores costos y peso (Pérez *et al.*, 2016). Panthapulakkal y Sain (2007) estudiaron las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales compuestos de cáñamo/fibra de vidrio-polipropileno (PP). Encontraron que el uso de materiales compuestos híbridos mejora las propiedades de flexión e impacto y observaron que la adición de fibra de vidrio en los compuestos de cáñamo-PP resultó en propiedades térmicas mejoradas, así como en la resistencia al agua de los compuestos.

La figura 15 muestra los resultados obtenidos para la resistencia a la flexión debido a la adición de diferentes porcentajes de fibra de vidrio al 30% de porcentaje en peso de fibra de agave en el panel. La resistencia a la flexión de panel de RP es mucho más alta que la del panel con fibra de agave solamente (30FA-0GF). Sin embargo, esta tiende a incrementarse desde la adición de 5% de fibra de vidrio y llega a su máxima resistencia con el 25% (30FA-25GF) de fibra de vidrio, en este compuesto se exhibe un incremento del 6% con respecto a RP y del 77.3% en comparación con el compuesto 30FA-0GF. Resultados similares son reportados por Thwe y Liao (2003).

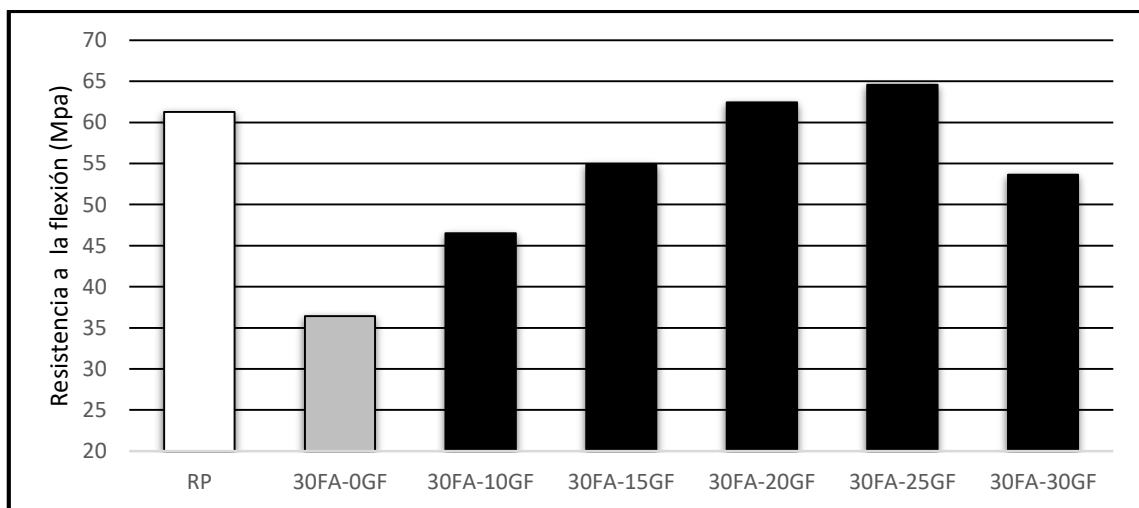


Figura 15. Resistencia a la flexión de biocompuestos híbridos

El módulo de flexión se presenta en la figura 16. Se observa que el contenido de fibra de agave por si sola aumenta ligeramente el módulo de elasticidad. Esta tendencia de aumento se ve mucho más marcada cuando se le adiciona la fibra de vidrio que concuerda con lo reportado por Thwe y Liao (2003), el módulo de elasticidad tiene su valor máximo en el compuesto 30FA-25GF que presenta un aumento del 65 y 62% en comparación con RP y 30FA-0GF respectivamente.

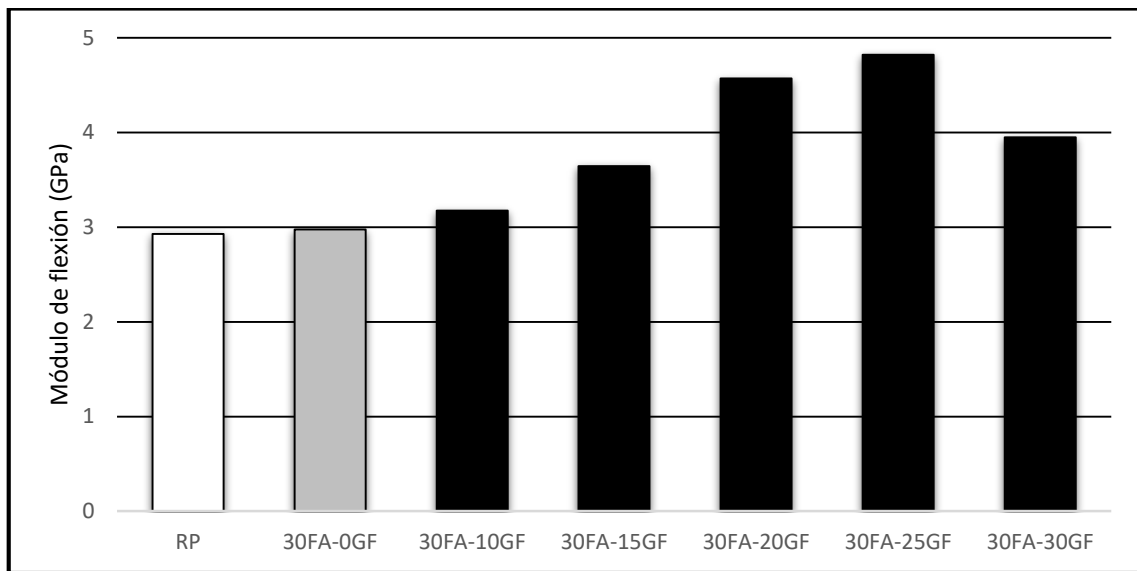


Figura 16. Módulo de flexión de biocompuestos híbridos

3.4.6.- Potenciales aplicaciones del material biocompuesto

Los compuestos reforzados con fibra natural se han utilizado en diversas aplicaciones para reemplazar los materiales convencionales (Sathishkumar *et al.*, 2013). La industria automotriz es el principal promotor de los biocompuestos (Thomas *et al.*, 2011). En Europa los fabricantes de automóviles les han dado mucho interés a los materiales termoplásticos reforzados utilizando fibras como abacá, kenaf, ramio (Chen *et al.*, 2005) cáñamo (Müssig *et al.*, 2006) y lino (Arbelaiz *et al.*, 2005) para utilizarlos en: revestimientos de puertas, estantes de paquetes, respaldos de los asientos, protectores de motores y reposacabezas,

así como en componentes exteriores del automóvil. Daimler Chrysler, es un usuario importante de compuestos de fibra natural en los componentes de molduras interiores como tableros y paneles de puertas que usan polipropileno y fibras naturales, ha aumentado su inversión en investigación y desarrollo en compuestos de lino/ poliéster para aplicaciones exteriores o semi-exteriores (Thomas *et al.*, 2011).

Los materiales compuestos de fibra natural ofrecen enormes oportunidades en el mercado de la construcción. Diversos productos compuestos a base de fibra natural, como laminados, paneles, tabiques, marcos de puertas, contraventanas y techos se han producido como una alternativa a los materiales de madera existentes (Thomas *et al.*, 2011). Uddin y Kalyankar (2011) fabricaron y analizaron la viabilidad estructural de paneles aislados estructurales de polipropileno reforzados con fibra de yute para reemplazar los laminados de madera y tableros de fibras orientadas (OSB) en los paneles aislados estructurales (SIP). Encontraron que la carga máxima alcanzada por los NSIP antes del fallo fue de 3.2KN, 53% más alta que OSB y el módulo de flexión de los NSIP es 190% más alto que los OSB. Además, la densidad de los NSIP es 30% menor que OSB lo que hace más ligero el material. En el cuadro 5 se hace una comparación de características encontradas en estudios similares para la aplicación de diferentes fibras naturales y que nos da pauta para definir las posibles aplicaciones de los materiales de estudio. Aunque el conocimiento de las propiedades mecánicas del biocompuesto probado no ofrece un panorama amplio de sus aplicaciones, es suficiente para introducirlo en las diferentes industrias. Dadas las características referidas y los resultados obtenidos en este estudio, entre las aplicaciones en las que se puede incursionar al material son: empaques de grado no alimenticio, paneles estructurales aislantes, defensas de automóviles, socket de prótesis transtibial, alerones automotrices y como exhibidores de productos en las mismas mezcaleras.

Cuadro 5. Comparación de propiedades mecánicas de materiales aplicados en diferentes áreas

Compuesto	% FC	RUT	MT	MOR	MF	RI	CH	Aplicación	Referencia
Poly-plátano	15	30.7	1.23			12.5	2.5	Empaques	Rodríguez <i>et al.</i> , 2014
PP-Jute	-	-	-	5.41	1.71	44.3	-	Paneles estructurales aislantes	Uddin y Kalyankar, 2011
GMC-Azdel	-	70	5.2	150	5	50	-	Defensas de automóviles	Davoodi <i>et al.</i> , 2010
Poly-Glass		65	7.3	66	-	-	-	Socket de prótesis transtibial	Odusote <i>et al.</i> , 2016
PLA-agave	10	2.8kN	2.5	-	-	-	-	Exhibidores	Rosa <i>et al.</i> , 2016
Poly-coco	5	32	1.4	-	-	-	-	Alerones Renault	Gómez <i>et al.</i> , 2009
Epoxi-agave									
Sin tratar	30	26.84	4.5	30.4	4.06	-	-	Empaques	Colin <i>et al.</i> , 2018
Tratado	30	28.54	2.97	40.8	2.7	61.9	12	Paneles	Colin <i>et al.</i> , 2018
Hibrido	30FA+ 7.5GF	-	-	64.57	4.82	-	-	Defensas	Colin <i>et al.</i> , 2018

%FC = Contenido de fibra, RUT = Resistencia Última a la Tracción, MT=Modulo de Tracción, MOR = Resistencia a la Flexión, MF = Modulo de Flexión, RI = Resistencia al Impacto, CH = Contenido de Humedad.

3.5.- Conclusiones

Una vez caracterizado el efecto que tiene el contenido y la longitud, el tratamiento químico y la hibridación de las fibras en las propiedades físico-mecánicas del biocompuesto de matriz de resina epóxica, se determinaron algunas posibles aplicaciones en diferentes industrias. Por lo anterior, se concluye que las fibras del bagazo proveniente de la elaboración de mezcal se pueden manejar de manera integral y aprovechar para obtener un beneficio al dar un valor agregado a este material.

La incorporación de fibras, en la matriz de resina epóxica, reduce la resistencia a la tracción y a la flexión justificando la incompatibilidad de la interfaz puesto que la fibra es hidrofílica y la matriz hidrofóbica. Sin embargo, se mejora el módulo de elasticidad del compuesto debido a la alta rigidez del material de refuerzo. Del análisis estadístico se observó que el contenido y la longitud tienen un efecto significativo en las propiedades mecánicas, sobre todo con una longitud de 3 mm y 30% de contenido. Con esta configuración se obtuvo un aumento del 29 y 28% en el módulo de tracción y flexión respectivamente, comparado con el biocompuesto de resina pura (RP)

Las modificaciones químicas causaron cambios en la morfología de la superficie de la fibra de agave. Se observaron mejoras en la resistencia mecánica de los biocompuestos además de menor peso. Sin embargo, hubo una notoria disminución del módulo de elasticidad en tracción y en flexión. Se observó que el tratamiento con bicarbonato de sodio es el más efectivo para la modificación de las fibras, ya que muestra mayores incrementos en todas las propiedades mecánicas probadas, sin embargo, presenta menor resistencia a la humedad. La interfaz fibra- matriz se mejoró con este tratamiento en las pruebas en seco, lo que resultó en una mejora de resistencia a la tracción (6%), flexión (23%) y dureza (46%) en comparación con biocompuestos de fibra sin tratar (FST) y una mejora de la resistencia al impacto (28%) en comparación con RP. Además, con este tratamiento se redujo la densidad del material en un 17% comparado con RP, lo que implementa materiales más ligeros.

En general, las propiedades de tracción, flexión e impacto de los compuestos disminuyeron después de la absorción de humedad. El tratamiento con NaOH ayudó a disminuir la absorción de agua, lo que limita la degradación del compuesto cuando se expone al agua.

En la prueba de flexión se encontró que una combinación de fibras de agave y fibras de vidrio es una buena opción para producir compuestos híbridos con mejores propiedades que las que se obtienen con la fibra de agave sola. Con la adición de 25% en peso de las fibras de vidrio (30-0-25FV) se obtuvieron

aumentos del 77.3% y 61.7% para la resistencia y módulo de flexión respectivamente, comparado con biocompuestos de FST. Comparado con RP se obtuvieron aumentos del 6 y 65%.

De acuerdo a los resultados encontrados, similares a lo reportado en investigaciones previas, se concluye que los materiales biocompuestos de matriz epóxica reforzados con fibras de bagazo de *A. angustifolia* pueden ser utilizados en industrias como la automotriz, la construcción y otras, específicamente para elaborar defensas o alerones de automóviles; paneles estructurales aislantes para construcción; empaques y como materiales exhibidores.

Agradecimientos

Uno de los autores (Jorge Colin Torres) agradece el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

3.6.- Literatura citada

- Agrawal, R., Saxena, N. S., Sharma, K. B., Thomas, S., & Sreekala, M. S. (2000). Activation energy and crystallization kinetics of untreated and treated oil palm fibre reinforced phenol formaldehyde composites. *Materials Science and Engineering: A*. **277(1-2)**, 77-82. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)005560](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)005560)
- Aguirre-Dugua, X., & Eguiarte, L. E. (2013). Genetic diversity, conservation and sustainable use of wild *Agave cupreata* and *Agave potatorum* extracted for mezcal production in Mexico. *Journal of Arid Environments*. **90**, 36-44. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.018>
- Arbelaiz, A., Fernandez, B., Cantero, G., Llano-Ponte, R., Valea, A., & Mondragon, I. (2005). Mechanical properties of flax fibre/polypropylene composites. Influence of fibre/matrix modification and glass fibre hybridization. *Composites Part A: applied science and manufacturing*. **36(12)**, 1637-1644. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.03.021>
- Alix, S., Lebrun, L., Morvan, C., & Marais, S. (2011). Study of water behaviour of chemically treated flax fibres-based composites: A way to approach the hydric interface. *Composites Science and Technology*. **71(6)**, 893-899. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.02.004>
- Alomayri, T., Assaedi, H., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2014). Effect of water absorption on the mechanical properties of cotton fabric-reinforced

- geopolymer composites. *Journal of Asian ceramic societies*. **2(3)**, 223-230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.05.005>
- ASTM International (1999). ASTM Standards D 570-98. Standard test method for water Absorption of Plastics. Recuperado de: <https://www.astm.org/database>.
- ASTM International (2003). ASTM Standards D 790-03. Standard Test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. Recuperado de: <http://mahshahr.aut.ac.ir/lib/exe/fetch.php?media=la>
- ASTM International (2004). ASTM Standards D 610-04. Standard test method for determining the Charpy impact resistance of notched Specimens of Plastics. Recuperado de: http://mahshahr.aut.ac.ir/lib/exe/fetch.php?media=labs:astm_
- ASTM International (2004). ASTM Standards D 785-03. Standard test method for Rockwell Hardness of plastics and electrical insulating materials. Recuperado de: http://mahshahr.aut.ac.ir/lib/exe/fetch.php?media=labs:astm_d785.pdf
- ASTM International (2015). ASTM Standards D 638-14. Standard Test method for tensile properties of plastics. Recuperado de: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~abo>
- Balasuriya, P. W., Ye, L., Mai, Y. W., & Wu, J. (2002). Mechanical properties of wood flake–polyethylene composites. II. Interface modification. *Journal of applied polymer science*. **83(12)**, 2505-2521. doi: <https://doi.org/10.1002/app.10189>
- Chaitanya, S., & Singh, I. (2017). Sisal fiber-reinforced green composites: Effect of ecofriendly fiber treatment. *Polymer Composites*. doi: <https://doi.org/10.1002/pc.24511>
- Chaitanya, S., & Singh, I. (2016). Novel Aloe Vera fiber reinforced biodegradable composites—Development and characterization. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. **35(19)**, 1411-1423. doi: <https://doi.org/10.1177/0731684416652739>
- Chen, Y., Sun, L., Chiparus, O., Negulescu, I., Yachmenev, V., & Warnock, M. (2005). Kenaf/ramie composite for automotive headliner. *Journal of Polymers and the Environment*. **13(2)**, 107-114. doi: <https://doi.org/10.1007/s10924-005-2942-z>
- Cisneros-López, E. O., Pérez-Fonseca, A. A., Fuentes-Talavera, F. J., Anzaldo, J., González-Núñez, R., Rodrigue, D., & Robledo-Ortiz, J. R. (2016). Rotomolded polyethylene-agave fiber composites: Effect of fiber surface treatment on the mechanical properties. *Polymer Engineering & Science*. **56(8)**, 856-865. doi: <https://doi.org/10.1002/pen.24314>
- Consejo Regulador del mezcal (CRM) (2017). Informe anual 2017. Recuperado de: <http://www.crm.org.mx/informes.html>. Consultado el 10 septiembre 2017.

- Corrales, F., Villaseca, F., Llop, M., Girones, J., Mendez, J. A., & Mutje, P. (2007). Chemical modification of jute fibers for the production of green-composites. *Journal of Hazardous Materials*, **144**(3), 730-735. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.103>
- Cortes Martínez, C. I. (2009). Propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo del *Agave angustifolia* Haw, residuo proveniente de la producción artesanal del mezcal. (Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR, Unidad Oaxaca). Consultada en <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/7288>
- Cortés Rodríguez A., Hernández de la Cerna C. (2017). The mezcal, its production and waste treatment. *Revista Alianzas y Tendencias*. **2**(8), 10-14. Recuperado de: http://www.ditco.buap.mx/recursos/documentos/revista/anio2_no8_2017/mezcal.pdf
- Cuéllar, A., & Muñoz, I. (2010). Fibra de guadua como refuerzo de matrices poliméricas. *Dyna*. **77**(162), 137-142. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/19792/1/15843-48985-1-PB.pdf>
- Davoodi, M. M., Sapuan, S. M., Ahmad, D., Ali, A., Khalina, A., & Jonoobi, M. (2010). Mechanical properties of hybrid kenaf/glass reinforced epoxy composite for passenger car bumper beam. *Materials & Design*. **31**(10), 4927-4932. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.021>
- Fiore, V.; Scalici, t.; Valenza, A. (2018). Effect of sodium bicarbonate treatment on mechanical properties of flax-reinforced epoxy composite materials". *Journal of Composite Materials*. **52**(8), 1061-1072. doi: <https://doi.org/10.1177/0021998317720009>
- Graupner, N., Herrmann, A. S., & Müssig, J. (2009). Natural and man-made cellulose fibre-reinforced poly (lactic acid) (PLA) composites: An overview about mechanical characteristics and application areas. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. **40**(6-7), 810-821. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.04.003>
- Hernández, E. P., Parga, M. D. C. C., & Hernández, J. C. G. (2016). Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología*. **18**(1), 148-164. doi: <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552>
- Hidalgo-Reyes, M., Caballero-Caballero, M., Hernández-Gómez, L. H., & Urriolagoitia-Calderón, G. (2015). Chemical and morphological characterization of *Agave angustifolia* bagasse fibers. *Botanical Sciences*. **93**(4), 807-817. doi: <http://dx.doi.org/10.17129/botsci.250>
- JA, M. H., Majid, M. A., Afendi, M., Marzuki, H. F. A., Hilmi, E. A., Fahmi, I., & Gibson, A. G. (2016). Effects of water absorption on Napier grass fibre/polyester composites. *Composite Structures*. **144**, 138-146. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.067>

- Jacques-Hernández, C., Herrera-Pérez, O., & Ramírez-De León, J. A. (2007). El Maguey Mezcalero y la agroindustria del mezcal en Tamaulipas. En lo ancestral hay futuro: Del tequila, los mezcales y otros agaves, eds. P. Colunga-GarcíaMarín, L. Eguiarte, A. Larqué, and D. Zizumbo-Villarreal. 287-317. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Jose_Ramirez_de_Leon/publication/236586645
- Jawaid, M. H. P. S., & Khalil, H. A. (2011). Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate polymers*. **86(1)**, 1-18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043>
- Joshi, S. V., Drzal, L. T., Mohanty, A. K., & Arora, S. (2004). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied science and manufacturing*. **35(3)**, 371-376. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>
- Kwon, H. J., Sunthornvarabhas, J., Park, J. W., Lee, J. H., Kim, H. J., Piyachomkwan, K., ... & Cho, D. (2014). Tensile properties of kenaf fiber and corn husk flour reinforced poly (lactic acid) hybrid bio-composites: role of aspect ratio of natural fibers. *Composites Part B: Engineering*. **56**, 232-237. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.003>
- Mahfoudh, A., Cloutier, A., & Rodrigue, D. (2013). Characterization of UHMWPE/wood composites produced via dry-blending and compression molding. *Polymer Composites*. **34(4)**, 510-516. doi: <https://doi.org/10.1002/pc.22455>
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (Eds.). (2005). *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. CRC press. Recuperado de: <https://scholar.google.com.mx/scholar>
- Müssig, J., Schmehl, M., Von Buttlar, H. B., Schönfeld, U., & Arndt, K. (2006). Exterior components based on renewable resources produced with SMC technology—Considering a bus component as example. *Industrial crops and products*. **24(2)**, 132-145. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.03.006>
- Mylsamy, K., & Rajendran, I. (2011). Influence of alkali treatment and fibre length on mechanical properties of short Agave fibre reinforced epoxy composites. *Materials & Design*. **32(8)**, 4629-4640. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.029>
- Odusote, J. K., Oyewo, A. T., Adebisi, J. A., & Akand, K. A. (2016). Mechanical properties of banana pseudo stem fibre reinforced epoxy composite as a replacement for transtibial prosthetic socket. *J. Assoc. Prof. Eng. Trinidad Tobago*. **44(2)**, 4-10. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/4b3d/ee6bfa4c90f0d45b4eb219a91132b24295e6.pdf>

- Panthapulakkal, S., & Sain, M. (2007). Injection-molded short hemp fiber/glass fiber-reinforced polypropylene hybrid composites—Mechanical, water absorption and thermal properties. *Journal of Applied Polymer Science*. **103**(4), 2432-2441. doi: <https://doi.org/10.1002/app.25486>
- Pérez-Fonseca, A. A., Arellano, M., Rodrigue, D., González-Núñez, R., & Robledo-Ortíz, J. R. (2016). Effect of coupling agent content and water absorption on the mechanical properties of coir-agave fibers reinforced polyethylene hybrid composites. *Polymer Composites*, **37**(10), 3015-3024. doi: <https://doi.org/10.1002/pc.23498>
- Pérez-Fonseca, A. A., Robledo-Ortíz, J. R., Ramirez-Arreola, D. E., Ortega-Gudiño, P., Rodrigue, D., & González-Núñez, R. (2014). Effect of hybridization on the physical and mechanical properties of high density polyethylene–(pine/agave) composites. *Materials & Design*. **64**, 35-43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.025>
- Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Liu, Y., Yang, G. C., & Zeng, H. M. (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Composites Science and technology*. **61**(10), 1437-1447. doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00046-X)
- Rout, J., Misra, M., Tripathy, S. S., Nayak, S. K., & Mohanty, A. K. (2001). The influence of fibre treatment on the performance of coir-polyester composites. *Composites Science and Technology*. **61**(9), 1303-1310. doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00021-5)
- Rodríguez, L. J., Sarache, W. A., & Orrego, C. E. (2014). Compuestos de Poliéster Reforzados con Fibra de Plátano/Banano (*Musa paradisiaca*) Modificada Químicamente: Comparación con Fibra de Vidrio y Fique (*Furcraea andina*). *Información tecnológica*. **25**(5), 27-34. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000500005>
- Rosa Sierra A., González Madariaga F. J., Gómez Gómez J. F., & Franco Urquiza E. A. (2016). Diseño y desarrollo de productos a base de compuestos formados por residuos de fibra de agave y bioplástico. *Congreso Internacional de Investigación en Tecnologías Estratégicas de Academia Journals*. Villa de Álvarez, Colima, México. ISBN 978-1-939982-25-4. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Alberto_Sierra2/publication/308929956_Diseño_y_desarrollo_de_productos_a_base_de_compuestos_formados_por_residuos_de_fibra_de_agave_y_bioplastico/links/57f8365708ae886b898366dd/Diseno-y-desarrollo-de-productos-a-base-de-compuestos-formados-por-residuos-de-fibra-de-agave-y-bioplastico.pdf
- Salazar, M. A. H., Velez, M. F. M., & Cuellar, K. J. Q. (2011). Desempeño mecánico del compuesto polietileno aluminio reforzado con agro fibras largas de fique (Mechanical behavior of polyethylene aluminum composite reinforced with continuous agro fique fibers). *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. 187-194. Recuperado de: <http://www.rlmm.org/ojs/index.php/rlmm/article/view/118>

- Silva-Santos, L., Hernández-Gómez, L. H., Caballero-Caballero, M., & López-Hernández, I. (2009). Tensile Strength of Fibers Extracted from the Leaves of the *angustifolia* Haw Agave in Function of their Length. In *Applied Mechanics and Materials*. **15**, 103-108. Trans Tech Publications. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.15.103>
- Sathishkumar, T. P., Navaneethakrishnan, P., Shankar, S., Rajasekar, R., & Rajini, N. (2013). Characterization of natural fiber and composites—A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. **32(19)**, 1457-1476. doi: <https://doi.org/10.1177/0731684413495322>
- Thomas, S., Paul, S. A., Pothan, L. A., & Deepa, B. (2011). Natural fibres: structure, properties and applications. In *Cellulose fibers: bio-and nano-polymer composites* (pp. 3-42). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-17370-7_1
- Thwe, M. M., & Liao, K. (2003). Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *Composites science and technology*. **63(3-4)**, 375-387. doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00225-7)
- Torres-Tello, E. V., Robledo-Ortiz, J. R., González-García, Y., Pérez-Fonseca, A. A., Jasso-Gastinel, C. F., & Mendizábal, E. (2017). Effect of agave fiber content in the thermal and mechanical properties of green composites based on polyhydroxybutyrate or poly (hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate). *Industrial Crops and Products*. **99**, 117-125. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.035>
- Tronc, E., Hernández-Escobar, C. A., Ibarra-Gómez, R., Estrada-Monje, A., Navarrete-Bolanos, J., & Zaragoza-Contreras, E. A. (2007). Blue agave fiber esterification for the reinforcement of thermoplastic composites. *Carbohydrate Polymers*. **67(2)**, 245-255. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.05.027>
- Uddin, N., & Kalyankar, R. R. (2011). Manufacturing and structural feasibility of natural fiber reinforced polymeric structural insulated panels for panelized construction. *International journal of polymer science*. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2011/963549>
- Wang, B., Panigrahi, S., Tabil, L., & Crerar, W. (2007). Pre-treatment of flax fibers for use in rotationally molded biocomposites. *Journal of reinforced plastics and composites*. **26(5)**, 447-463. doi: <https://doi.org/10.1177/0731684406072526>
- Yan, L., Chouw, N., & Yuan, X. (2012). Improving the mechanical properties of natural fibre fabric reinforced epoxy composites by alkali treatment. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. **31(6)**, 425-437. doi: <https://doi.org/10.1177/0731684412439494>
- Zhang, Z., Chen, S., & Zhang, J. (2013). Blends of poly (vinyl chloride) with α -methylstyrene-acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer: Thermal properties, mechanical properties, and morphology. *Journal of Vinyl and Additive Technology*. **19(1)**, 1-10. doi: <https://doi.org/10.1002/vnl.20326>

ANEXOS

Preparación de fibras y equipo utilizado



Figura 1. Recolección de fibras de agave



Figura 2. Lavado de fibras de agave



Figura 3. Secado de fibras de agave



Figura 4. Guillotina para cortar papel



Figura 5. Molino Wiley



Figura 6. Horno de laboratorio Quincy Lab



Figura 7. Tamiz vibratorio Fritsch

Modificación de las fibras



Figura 8. Agitador magnético VWR



Figura 9. Sistema de filtrado por vacío

Equipos utilizados para preparar probetas y realizar ensayos físico-mecánicos



Figura 10. Sierra radial OMGA 500



Figura 11. Ensayo de tracción

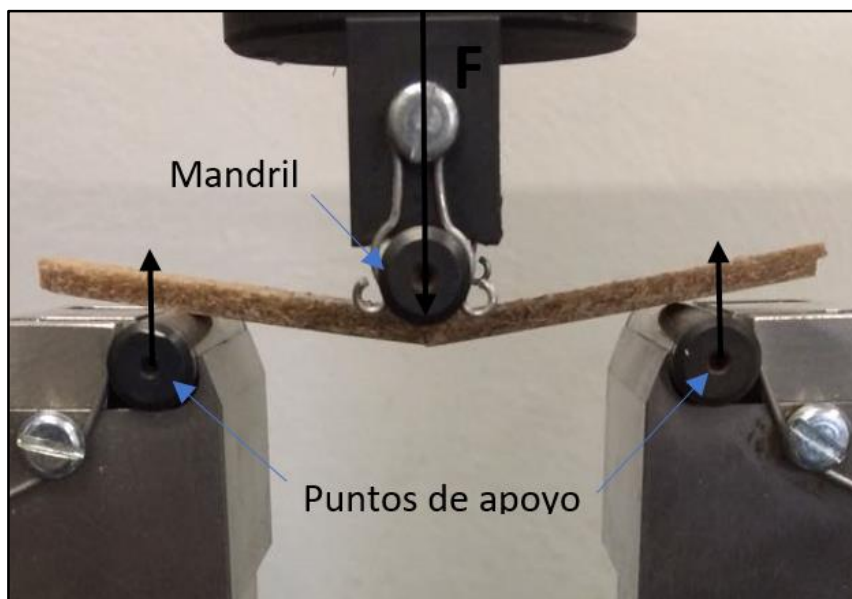


Figura 12. Ensayo de Flexión



Figura 13. Máquina de impacto CEAST 9050



Figura 14. Durómetro Mitutoyo ARK

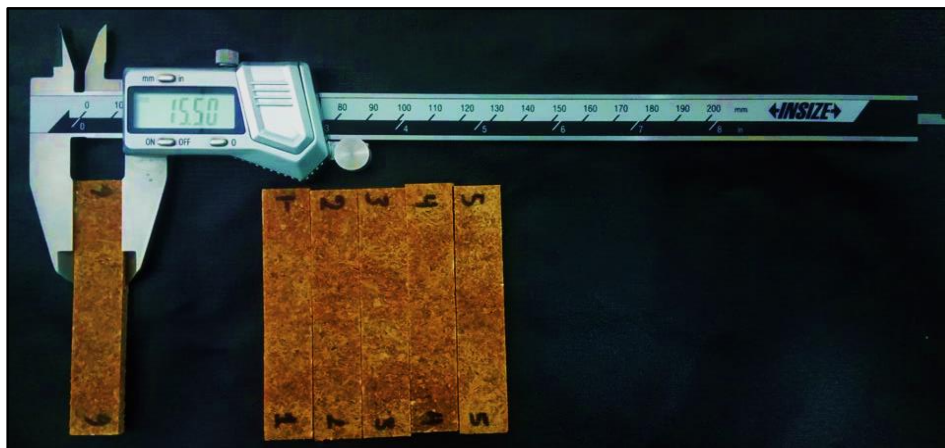


Figura 15. Vernier digital INSIZE



Figura 16. Balanza de precisión OHASUS, Discovery.

Análisis de superficie de fractura



Figura 17. Microscopio electrónico de barrido QUANTA 504



Figura 18. Recubridor de metal QOURON-Q150R ES