

**ELABORACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO BIODEGRADABLE MEDIANTE  
COLONIZACIÓN FÚNGICA DE *Ganoderma lucidum* EN FIBRAS NATURALES**



**JERSON ALEJANDRO LUNA CÓRDOBA  
ANGIE MARCELA MUÑOZ POMELO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL  
POPAYÁN  
2019**

**ELABORACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO BIODEGRADABLE MEDIANTE  
COLONIZACIÓN FÚNGICA DE *Ganoderma lucidum* EN FIBRAS NATURALES**

**JERSON ALEJANDRO LUNA CÓRDOBA  
ANGIE MARCELA MUÑOZ POMELO**

Trabajo de grado en la modalidad de Investigación para optar al título de Ingeniero  
Agroindustrial

Directores  
JOSÉ FERNANDO SOLANILLA DUQUE, Ph. D  
ELSA SUSANA CAJIAO BUITRÓN, M. Sc

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL  
POPAYÁN  
2019**

Nota de Aceptación

Los directores y los Jurados han leído el presente documento, escucharon la sustentación del mismo por sus autores y lo encuentran satisfactorio.

---

JOSÉ FERNANDO SOLANILLA, Ph. D  
Director

---

ELSA SUSANA CAJIAO BUITRÓN, M Sc  
Director

---

MARIO GERMAN ENRIQUEZ  
Presidente del jurado

---

JHON JAIRO PALECHOR TROCHEZ  
Jurado

Popayán 21 de octubre del 2019

## DEDICATORIA

### **Angie Marcela Muñoz Pomeo**

Este trabajo de grado va dedicado a toda mi amada familia, a mi mamá Marisol a mi papá Silvio, hermana Caro y mi hermanita Sarita por apoyarme y acompañarme durante todo el proceso de mi formación profesional, por permitirme llegar a un nivel de educación superior.

Y a todas las demás personas como amigos y familia que de alguna u otra manera estuvieron durante todo este tiempo brindándome su apoyo, compañía, conocimientos que me ayudaron en mi formación.

### **Jerson Alejandro Luna Córdoba**

*Dedico este trabajo a Dios por permitirme perseverar y darme la fortaleza y sabiduría para realizar este trabajo.*

*A mis padres Jaime y Bella, a mi hermano Andrés, a mis sobrinitas Valentina y Luisa, a mi familia en general por su incondicional apoyo, amor, motivación y sacrificio durante esta etapa universitaria.*

*A todos mis compañeros y amigos que de una u otra forma hicieron parte en todo este proceso de formación.*

Las cosas más importantes no están escritas en los libros.  
Tienes que aprenderlas experimentándolas tú mismo

Sakura Haruno.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a innovación Cauca por la financiación del proyecto denominado “Elaboración de un material compuesto a partir de residuos lignocelulósicos agroindustriales para el desarrollo de empaques biodegradables” ejecutado por la universidad del Cauca.

Agradecemos al grupo de investigación Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial – CYTBIA perteneciente a la facultad de ciencias agrarias de la Universidad del Cauca. Así mismo agradecemos a nuestros directores José Fernando Solanilla Duque y Susana Cajiao Buitrón por su apoyo y colaboración durante la ejecución del proyecto.

Agradecemos a la Universidad del Cauca por permitirnos el uso de las instalaciones como el laboratorio de Reología y empaques, laboratorio de microscopía y las plantas piloto de alimentos.

## CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	14
1. MARCO REFERENCIAL	16
1.1. LOCALIZACIÓN.	16
1.2. MARCO TEÓRICO	16
1.2.1. Poliestireno expandido.	16
1.2.2. Materiales compuestos.	16
1.2.3. Materiales compuestos de matriz polimérica.	17
1.2.4. Materiales compuestos de matriz cerámica.	17
1.2.5. Materiales compuestos de matriz metálica.	17
1.2.6. Material biodegradable.	17
1.2.7. Materiales compuestos de matriz fúngica.	18
1.2.8. Materiales compuestos de matriz biodegradable.	18
1.2.9. Materiales compuestos de matriz biodegradable.	18
1.2.10. Materiales lignocelulósicos o biomasa.	19
1.2.11. Reino fungí	22
1.2.12. Propiedades mecánicas.	23
1.2.13. Propiedades térmicas.	24
1.3. MARCO HISTÓRICO	24

	pág
1.3.1. Residuos lignocelulósicos.	24
1.3.2. Materiales Compuestos.	25
2. METODOLOGÍA	29
2.1. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CRECIMIENTO DE <i>G. LUCIDUM</i> EN LOS RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS	29
2.1.1. Obtención de las materias primas.	29
2.1.2. Adecuación de materias primas.	30
2.1.3. Molienda y tamizado de los residuos lignocelulósicos.	30
2.1.5. Caracterización físico química de la materia prima.	32
2.1.6. Preparación del medio de cultivo e inoculación del hongo.	34
2.1.7. Inoculación y medición del crecimiento radial.	36
2.1.8. Diseño experimental en la fase 1.	36
2.2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS Y TÉRMICAS DEL MATERIAL COMPUESTO OBTENIDO	36
2.2.1. Elaboración del material compuesto.	36
2.2.2. Caracterización del material por sus propiedades mecánicas.	38
2.2.3. Diseño experimental de la fase 2.	40
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
3.1. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CRECIMIENTO DE <i>GANODERMA LUCIDUM</i> EN LAS FIBRAS DE COCO, BAGAZO DE FIQUE Y BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR	41

	pág
3.1.1. Caracterización morfológica de los sustratos.	41
3.1.2. Caracterización fisicoquímica de la materia prima.	42
3.1.4. Resultados elaboración del medio de cultivo, inoculación y velocidad de crecimiento.	43
3.2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS Y TÉRMICAS DEL MATERIAL ESPUMADO OBTENIDO	47
3.2.1. Resultados elaboración material espumado.	47
3.2.2. Caracterización del material espumado por sus propiedades mecánicas y térmicas.	50
4. CONCLUSIONES	69
5. RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS	86



## LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Material compuesto a base de micelio con cáscara de arroz y vidrio	18
Figura 2. Planta de fique ( <i>Furcraea andina</i> )	20
Figura 3. Sección transversal de un fruto de la palma de coco ( <i>Cocos nucifera</i> )	21
Figura 4. Caña de azúcar ( <i>Saccharum officinarum</i> )	22
Figura 5. Cuerpos fructíferos de <i>G. lucidum</i>	23
Figura 6. Micelio, hifas y célula fúngica	23
Figura 7. Materias primas recolectadas	29
Figura 8. Adecuación de los residuos lignocelulósicos	30
Figura 9. Molienda de residuos lignocelulósicos	31
Figura 10. Equipos utilizados en el proceso de tamizaje	31
Figura 11. Lavado de bagazo de fique tamizado y molido	32
Figura 12. Sistema de observación	32
Figura 13. Medición de pH	33
Figura 14. Máquina universal de ensayos adaptada para pruebas de compresión	39
Figura 15. Máquina universal de ensayos adaptada para pruebas de flexión	39
Figura 16. Residuos lignocelulósicos observados con estereoscopio	41
Figura 17. Colonización de <i>G. lucidum</i> en residuos lignocelulósicos	45
Figura 18. Crecimiento micelial promedio	46
Figura 19. Modelado del crecimiento con la ecuación de Monod	47
Figura 20. Material obtenido con fibra de fique	48
Figura 21. Material obtenido con fibra de coco.	48
Figura 22. Material obtenido con bagazo de caña de azúcar	49

	pág
Figura 23. Especímenes de material obtenido con bagazo de caña de azúcar para pruebas de compresión	51
Figura 24. Prueba de compresión del material compuesto	52
Figura 25. Esfuerzo promedio vs deformación de caña T16, caña T50 y EPS (compresión)	52
Figura 26. Deformación vs esfuerzo Tamiz 16 (Compresión)	54
Figura 27. Deformación vs Esfuerzo Tamiz 50 (Compresión)	54
Figura 28. Deformación vs Esfuerzo blanco (Compresión)	55
Figura 29. Prueba de compresión de flexión del material compuesto	56
Figura 30. Alargamiento vs Esfuerzo Tamiz 16 (Flexión)	57
Figura 31. Alargamiento vs Esfuerzo Tamiz 50 (Flexión)	58
Figura 32. Alargamiento vs Esfuerzo Blanco (Flexión)	58
Figura 33. Diagrama de barras para densidad	59
Figura 34. TGA y DTG del bagazo de caña	61
Figura 35. DSC para bagazo de caña de azúcar	61
Figura 36. TGA y DTG para <i>G. lucidum</i>	62
Figura 37. DSC para <i>G. lucidum</i>	63
Figura 38. TGA y DTG para el EPS	64
Figura 39. DSC para EPS	64
Figura 40. TGA y DTG para el material espumado	65
Figura 41. DSC para material espumado	66
Figura 42. DTG de las cuatro muestras	67
Figura 43. TGA de las cuatro muestras	67

## LISTA DE CUADROS

	Pág
Cuadro 1. Relación número de tamiz y abertura	31
Cuadro 2. Composición del medio de cultivo	35
Cuadro 3. Codificación de tratamientos para crecimiento radial.	36
Cuadro 4. Diseño experimental de la fase 1.	36
Cuadro 5. Composición solución basal	37
Cuadro 6. Diseño experimental de la fase 2	40
Cuadro 7. Codificación para la realización de las pruebas térmicas	40
Cuadro 8. Resultados de la relación de aspecto evaluada	42
Cuadro 9. Ensayos de pH realizados	43
Cuadro 10. Resumen análisis fisicoquímicos de los residuos lignocelulósicos	43
Cuadro 11. Velocidades de crecimiento micelial	44
Cuadro 12. Análisis estadístico	43
Cuadro 13. Esfuerzo y módulo de Young del ensayo de compresión.	53
Cuadro 14. Análisis estadístico	53
Cuadro 15. Análisis estadístico	56
Cuadro 16. Esfuerzo y módulo de Young del ensayo de flexión	57
Cuadro 17. Resultados de prueba de densidad aparente	59

## LISTA DE ANEXOS

	Pág
ANEXO A. Adecuación y caracterización de los residuos lignocelulósicos.	86
ANEXO B. Determinación de la velocidad de crecimiento de <i>Ganoderma Lucidum</i> en los tres residuos lignocelulósicos.	95
ANEXO C. Determinación de las propiedades mecánicas del material elaborado con residuos lignocelulósicos mediante colonización fúngica.	111

## RESUMEN

Se evaluaron las condiciones para el crecimiento de *Ganoderma lucidum* en tres residuos lignocelulósicos bagazo de fique, bagazo de caña y fibra de coco.

Los residuos lignocelulósicos fueron cortados, molidos y después tamizados en mallas con aberturas de 2, 1.18, 0.6, 0.3 mm que corresponden al tamiz 10, 16, 30 y 50 respectivamente. Se calculó la relación de aspecto la cual consiste en la relación de la longitud y el diámetro de las fibras, se obtuvieron valores alrededor de 20 para coco, 3 para fique y 8 para caña. Se cultivaron cepas de *Ganoderma lucidum* en tres medios de cultivo elaborados con los residuos lignocelulósicos obtenidos en los fondos del tamiz 50, para evaluar su velocidad de crecimiento, siendo el medio con fibra de coco el más rápido con una velocidad promedio de 0,4115 mm/h, después el bagazo de caña con 0,3356 mm/h, y el bagazo de fique con una velocidad de 0,1427 mm/h.

Se realizaron los materiales compuestos con fibras del tamiz 16 y 50 para los tres residuos lignocelulósicos con 10 réplicas, sin embargo, solo fue posible realizar pruebas físico mecánicas a las muestras con bagazo de caña de azúcar siguiendo las normas ASTM C 203, ASTM D 1621, ASTM D 3748, ASTM D 3418 y E 1131.

En resistencia a la flexión y compresión el mejor tratamiento fue el del tamiz 16 con un promedio de esfuerzo a la flexión de 26,255 KPa y un promedio de resistencia a la compresión de 53,870 KPa. Una densidad de 113,372 y 93,966 g/cm<sup>3</sup> para tamiz 16 y tamiz 50 respectivamente.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, para el año 2018, se produjeron aproximadamente 127.000 toneladas de coco, siendo el Cauca uno de los departamentos con mayor rendimiento en la producción, con 9,5 Ton/ha, solamente superado por el Chocó con 12 Ton/ha (Minagricultura, 2018a). La industria del coco genera concha y fibras como residuos; se estima que, de 1.000.000 Ton producidas, 166.000 (17 %) son de copra (Granados y López, 2002) y el 83 % restante es considerado residuos. A pesar de que estos residuos suelen ser utilizado en la elaboración de artesanías o en la agricultura como fertilizantes (Schmitt *et al.*, 2018); el problema radica en la necesidad de alternativas de uso, ya que de los miles de toneladas que se originan después de cada cosecha, la mayoría son quemadas impactando de forma negativa el medio ambiente (Hawash *et al.*, 2017).

En el caso del fique en Colombia, en el año 2018 se cultivaron cerca de 17.000 hectáreas, para una producción de 18.000 Ton/año (Minagricultura, 2018b), de las cuales el 4 % se utiliza con fines comerciales como la fabricación de sacos y el 96 % corresponde a residuos como jugo y bagazo, a los cuales generalmente se les da una inadecuada disposición en los campos afectando las fuentes hídricas y los suelos por los elevados niveles de saponinas que contienen, causando contaminación ambiental (Quintero *et al.*, 2012).

En la industria azucarera después de extraer el jugo rico en azúcar se genera en gran cantidad bagazo, un desecho rico en celulosa que se obtiene durante todo el año. El bagazo de caña posee características morfológicas y propiedades físico-químicas que permiten que sea catalogado como un buen material para ser usado como fibro-refuerzo (Osorio, Varón y Herrera, 2007).

Por otro lado, están los derivados del petróleo en especial el poliestireno expandido (EPS) producido en gran cantidad como material de empaquetado, construcción, entre otros usos, cada vez aumenta su demanda en el mundo generando más contaminación porque ocupa mucho espacio tanto en vertederos como en rellenos sanitarios, ya que del 95 al 98 % de este material está compuesto por aire (Tan y Khoo, 2005).

Por consiguiente, se busca crear nuevas alternativas para mitigar la creciente contaminación ya que para el año 2020 se proyecta una producción de 500 millones de toneladas (Greenpace, 2016), esto se ha convertido en un problema debido al tiempo en que tarda en descomponerse y el impacto que tiene en el medio ambiente durante el proceso de degradación (Gil *et al.*, 2019). Para ello se requiere la obtención de materiales amigables con el medio ambiente en donde se usen recursos naturales para garantizar su biodegradabilidad y reemplazar parcialmente el poliestireno expandido como material de embalaje.

Recientemente se ha trabajado en la investigación de biomateriales compuestos amigables con el medio ambiente a partir de residuos lignocelulósicos y hongos comestibles (López *et*

*al.*, 2016), en este sentido el hongo cumple la función de matriz y los residuos actúan como relleno o refuerzo. De esta forma se busca elaborar un material alternativo en donde se utilicen los residuos fibrosos generados en el sector agrícola junto con *G. lucidum* un hongo de pudrición blanca que genera enzimas para degradar residuos lignocelulósicos hasta compactarlos generando un material compuesto reforzado por las fibras.

## 1. MARCO REFERENCIAL

### 1.1. LOCALIZACIÓN.

El presente estudio se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Reología y Empaques de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de la Universidad del Cauca, ubicado en el kilómetro dos, vía vereda las Guacas del municipio de Popayán – Cauca.

### 1.2. MARCO TEÓRICO

**1.2.1. Poliestireno expandido.** El poliestireno expandido (EPS) ha sido ampliamente utilizado en muchas industrias durante más de 30 años. Es una espuma dura blanca que se utiliza principalmente como material de embalaje o como amortiguador (inserciones) para una amplia gama de aplicaciones, incluido el embalaje de productos comerciales y electrónicos. El EPS se produce a partir de un monómero de hidrocarburo, llamado estireno. El aire lo compensa aproximadamente el 95-98 % del contenido total del material. Tiene una excelente amortiguación que proporciona buena protección a una amplia gama de bienes o productos. También es ligero y duradero, posee buena resistencia térmica, aislamiento, es resistente a reacciones químicas o corrosivas, y es rentable de usar y producir (Tan y Khoo, 2005).

**1.2.2. Materiales compuestos.** Son combinaciones macroscópicas de dos o más materiales diferentes, que poseen una interfase discreta y reconocible que los separa. Debido a ello, son heterogéneos y sus propiedades no son las mismas en todo su volumen. Si bien algunos materiales compuestos son naturales, como la madera o el hueso, la gran mayoría son diseñados y fabricados con el objetivo de obtener otros con una combinación específica de propiedades, que difícilmente se encuentren en los cerámicos, los plásticos o los metales. Por ejemplo, en la industria del transporte son necesarios materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto y que resistan bien la corrosión y el desgaste, propiedades éstas que rara vez se dan juntas; por lo que se diseña un material según la aplicación específica.

A pesar de haberse obtenido materiales con unas propiedades excepcionales, su uso práctico no siempre es factible, dado que se trata, en general, de materiales caros y de difícil fabricación. Una característica de todos los materiales compuestos es que, en cada uno de ellos, se pueden distinguir dos componentes bien diferenciados: la matriz y el refuerzo o fase discontinua (Stupenengo, 2011).

**Matriz para materiales compuestos:** se le llama matriz a la fase que une el refuerzo, está se filtra por medio de las fibras y da la forma requerida según el diseño requerido, influyendo notablemente en las propiedades del compuesto final.



En este mismo contexto podemos distinguir diferentes matrices que se clasifican según su naturaleza como: compuestos de polímeros, metales y matrices cerámicas, a menudo designados como PMC, MMC y CMC, respectivamente. (Park y Seo, 2011). Además de estas, en la actualidad se están considerando nuevas matrices biodegradables, que buscan darle al material un lado más amigable, con fuentes renovables o productos de reciclaje. (Illana C., 2014)

**Refuerzo (fase discontinua):** El material de refuerzo es la fase discontinua (o dispersa) que se agrega a la matriz, para conferir al compuesto alguna propiedad que ésta no posee. En general, el refuerzo se utiliza para incrementar la resistencia y rigidez mecánicas, aunque también es útil para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión. El refuerzo puede ser en forma de partículas o de fibras. Como regla general, es más efectivo cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz, o cuando se incrementa la relación longitud/diámetro de la fibra (Stupenengo, 2011).

**1.2.3. Materiales compuestos de matriz polimérica.** El material compuesto de matriz polimérica, microscópicamente es un material no homogéneo que utiliza un polímero orgánico como matriz y una fibra como refuerzo (Wang, R. M., Zheng, S. R., y Zheng, Y. P., 2011). Las resinas incorporadas como matrices son de tipo termoestables y termoplásticos dentro de los cuales se pueden encontrar las resinas poliéster, viniléster, epoxi, y fenólicas o polietileno, polipropileno y poliuretano en el caso de las termoplásticas; y, como materiales de refuerzo se utilizan tipos básicos de fibra como son vidrio, carbono, aramida y boro. (Kar K., 2017)

**1.2.4. Materiales compuestos de matriz cerámica.** Los materiales compuestos de matriz cerámica pueden estar integrados de componentes con diferentes propiedades ya que la encargada de darle la forma a este material es la cerámica, que además de ser de origen inorgánico y no metálica, posee muchas variedades (Mileiko, S. T., 1997). Hasta ahora estas matrices son compuestas principalmente por óxido de aluminio o silicio (Brigante, 2014).

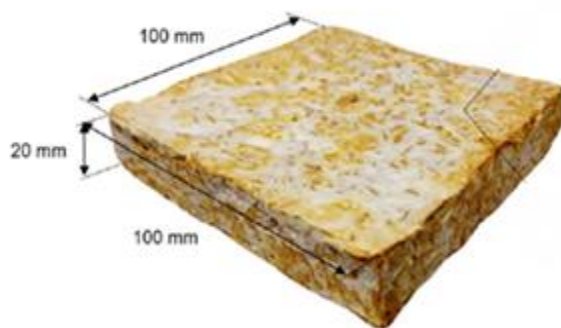
**1.2.5. Materiales compuestos de matriz metálica.** Los compuestos de matriz metálica (MMC) comprenden una gama relativamente amplia de materiales definidos por la matriz metálica, tipo de refuerzo, y re- geometría de la aplicación (Kostikov, V. I., y Kilin, V. S. 1998). Este tipo de matrices poseen una alta plasticidad otorgándole al material una mayor resistencia a la temperatura (Valery, V., y Evgeny, M. 2001). La mayoría de los sistemas metálicos han sido explorados, para uso en materiales compuestos de matriz metálica, incluidos Al, Be, Mg, Ti, Fe, Ni, Co y Ag. Pero uno de los metales más comunes para la elaboración de esta matriz es una aleación de aluminio que permite obtener una reducción de peso del material (Brigante, D. 2014).

**1.2.6. Material biodegradable.** La biodegradabilidad se rige por las normas ASTM D6400 (Estados Unidos), EN13432 (Europa) e ISO17088 (internacional). Estos afirman que los

plásticos verdaderamente biodegradables son aquellos que se biodegradan como resultado de la acción natural de microorganismos como bacterias, hongos y algas (Pratt, Lant, y Laycock, 2019).

**1.2.7. Materiales compuestos de matriz fúngica.** Este material compuesto utiliza micelios de diferentes hongos filamentosos como matriz que colonizan el sustrato o material de refuerzo logrando crear una red de células miceliales interconectadas (Islam *et al.*, 2018). Dentro de los hongos usados en estas matrices, se encuentra el *Pleurotus sp.* (López *et al.*, 2016) *Trametes ochracea* (Figura 1), (Appels *et al.*, 2019).

Figura 1. Material compuesto a base de micelio con cáscara de arroz y vidrio



Fuente: (Jones *et al.*, 2018)

**1.2.8. Materiales compuestos de matriz biodegradable.** Los compuestos biodegradables están constituidos por matrices de diferente naturaleza (Scott, 1999), entre ellos se puede encontrar los polímeros biodegradables que pueden derivarse de resinas sintéticas o naturales de origen vegetal como el almidón (Tharanathan, 2003), animal como el colágeno (O'brien *et al.*, 2013) o la quitina mayoritariamente obtenida de crustáceos (Fuentes, C., y Acosta, J. 2006), microbiano como el ácido poliláctico (Lazaridou *et al.*, 2003) y general de origen agrícola como lípidos, grasas e hidrocoloides como proteínas y polisacáridos (Villada *et al.*, 2007). Además de tener una composición renovable o reciclable, los compuestos biodegradables deben satisfacer otros requerimientos dentro de los cuales se encuentran una fabricación energética y económicamente eficiente (Jones *et al.*, 2017), durante ninguna etapa de su ciclo puede producir algún tipo de contaminante o material tóxico,

**1.2.9. Materiales compuestos de matriz biodegradable.** Los compuestos biodegradables están constituidos por matrices de diferente naturaleza (Scott, 1999), entre ellos se puede encontrar los polímeros biodegradables que pueden derivarse de resinas sintéticas o naturales de origen vegetal como el almidón (Tharanathan, 2003), animal como el colágeno (O'brien *et al.*, 2013) o la quitina mayoritariamente obtenida de crustáceos (Fuentes, C., y Acosta, J. 2006), microbiano como el ácido poliláctico (Lazaridou *et al.*, 2003) y general de origen agrícola como lípidos, grasas e hidrocoloides como proteínas y

polisacáridos (Villada *et al.*, 2007). Además de tener una composición renovable o reciclable, los compuestos biodegradables deben satisfacer otros requerimientos dentro de los cuales se encuentran una fabricación energética y económicamente eficiente (Jones *et al.*, 2017), durante ninguna etapa de su ciclo puede producir algún tipo de contaminante o material tóxico,

La disposición final (reciclaje, compostaje, etc) debe ser cuidadosamente elegida y evaluada para que permita al residuo reincorporarse a los ciclos biológicos de manera apropiada sin causar ninguna alteración negativa. (Arifin y Yusuf, 2013)

**1.2.10. Materiales lignocelulósicos o biomasa.** Se emplea el término biomasa para referirse a la materia orgánica de origen animal (zoomasa), vegetal (fitomasa) como también los residuos y desechos orgánicos. La fitomasa también conocida como biomasa lignocelulósica hace referencia a la materia vegetal seca, que es abundante y generalmente no aprovechada o sub utilizada (Dhyani y Bhaskar, 2018). Esta biomasa se compone principalmente de lignocelulosa y comprende aproximadamente el 50 % de toda la materia vegetal generada a partir de la fotosíntesis. La lignocelulosa es el resultado de tres polímeros que se encuentran fuertemente unidos por enlaces covalentes y fuerzas no covalentes, estos son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina (Sánchez, 2009).

**Celulosa:** la celulosa es el compuesto orgánico más abundante, siendo un recurso renovable y un polímero natural biodegradable. Es un homopolímero lineal conformado por unidades de D-glucosa, que se encuentran unidos mediante el enlace  $\beta$ -1,4 glucosídico, con alto peso molecular y polidisperso. Este polímero contiene tres grupos hidroxilos reactivos libres por unidad, en los carbonos 2, 3 y 6, generalmente accesible a la conversión típica de grupos -OH primarios y secundarios. Las moléculas de celulosa tienden a formar puentes de hidrógeno inter e intramoleculares; los enlaces covalentes dentro y entre las unidades de glucosa, dan como resultado una molécula recta y rígida con alta resistencia a la tensión, lo que afecta la morfología, rigidez, orientación, resistencia y reactividad que presentan las cadenas celulósicas.

La celulosa puede ser obtenida de árboles, cereales, algodón, yute, cáñamo, agave, entre otros o de algunas bacterias; en gran parte actúa como material estructural, caracterizándose por ser hidrofílico, quiral, biodegradable y por su alta capacidad de modificación química (Porrás cárdenas *et al.*, 2012).

**Hemicelulosa:** es una estructura compleja de carbohidratos, que consiste en polímeros de diferentes azúcares como xilosa y arabinosa (pentosas), manosa, glucosa y galactosa (hexosas) y ácidos de azúcar. El componente dominante de la hemicelulosa de la madera y plantas agrícolas es el xilano. La hemicelulosa tiene un peso molecular más bajo que la celulosa, con cadenas laterales cortas de diferentes polímeros de azúcares, fáciles de hidrolizar. La hemicelulosa sirve como una conexión entre la lignina y las fibras de celulosa y le da rigidez al conjunto de celulosa-hemicelulosa-lignina (Lucenius *et al.*, 2019) (Cortés, 2011).

**Lignina:** la lignina es un polímero natural heterogéneo, constituyente característico de las plantas; es un polímero fenólico de unidades de fenilpropano, unidas entre sí por enlaces carbono-carbono (C-C) y éter (C-O-C) con una estructura amorfa reticulada tridimensional; es una sustancia hidrofóbica, cuya red tridimensional le proporciona rigidez a la pared celular y la habilita para resistir las fuerzas de compresión. La multifuncionalidad química de la lignina le otorga propiedades variadas, que permiten un apreciable número de transformaciones químicas (Porras *et al.*, 2012).

**Fique (*Furcraea andina*):** proviene de Centro y Sur América; está localizado en países como Colombia, Venezuela, Ecuador y México, donde las condiciones tropicales son relativamente estables. Colombia es el país de mayor producción, con cerca de 30.000 Ton/año. Al extraer la fibra natural del fique, solo se aprovecha el 4 % del peso total de la hoja, el restante 96 % conforma el bagazo, material desaprovechado que produce un impacto negativo sobre el medio ambiente, al ser vertido en corrientes de agua durante el proceso de lavado de la cabuya (Echeverri, Franco y González, 2015).

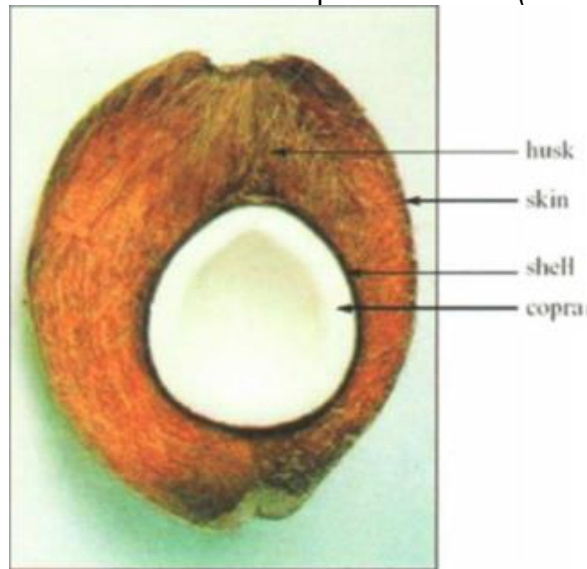
Figura 2. Planta de fique (*Furcraea andina*)



**Bagazo de fique:** una de las mejores alternativas que tienen los residuos de desfibrado es su utilización como abono orgánico. La cantidad de elementos nutritivos que estos tienen y la materia orgánica que proporcionan los hacen muy valiosos. En un análisis comparativo entre la gallinaza y el abono orgánico producido a partir del bagazo de fique se encontró que el bagazo es superior en nitrógeno, magnesio, potasio, sodio, hierro, manganeso, cobalto y materia orgánica. El bagazo también se puede aprovechar como medio de cultivo para champiñones, aglomerados, relleno de colchones o musgo ecológico (Echeverri, Franco y González, 2015), (Figura 2).

**Coco (*Cocos nucifera*):** pertenece a la familia Arecaceae; la palma de coco se produce en 92 países, en aproximadamente 11,8 millones de hectáreas de tierra. La producción mundial se ha estimado en 61.7 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de 5.2 Ton/ha. Indonesia, Filipinas y la India son los mayores productores de palma de coco (Dubey *et al.*, 2017), (Figura 3).

Figura 3. Sección transversal de un fruto de la palma de coco (*Cocos nucifera*)



Fuente: (Sengupta y Basu, 2017)

**Fibra de coco:** la fibra de coco está disponible entre la piel y la cáscara es un material multicelular, lignocelulósico, duro; presenta algunas ventajas como agro renovabilidad, biodegradabilidad y buena combinación de resistencia, longitud, extensibilidad, recuperación de humedad y alta durabilidad; posee resistencia a la luz solar, el agua salina y los microorganismos.

En contraposición se encuentra su naturaleza tosca, longitud variable y finura, naturaleza algo rígida y hosca. El residuo de la fibra de coco como sustrato en cultivos agrícolas ha sido utilizado exitosamente, como en los cultivos de rosa en Colombia y la gerbera y las orquídeas en Costa Rica, debido a sus propiedades físicas, facilidad de manejo y carácter ecológico (Quiñonez, 2014).

**Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*):** la caña de azúcar es un miembro de la tribu Andropogoneae de la familia Poaceae. Es uno de los cultivos más eficientes en términos de eficiencia fotosintética y producción de biomasa. La caña de azúcar se encuentra entre los diez cultivos más plantados en todo el mundo. Casi mil millones de toneladas se cosechan anualmente en todo el mundo. La importancia de la industria de la caña de azúcar para los países tropicales y subtropicales se debe no solo a la producción de azúcar, que es el principal producto de exportación para muchas economías en desarrollo, sino también a sus subproductos (Selman-Housein *et al.*, 2000).

**Bagazo de caña:** el bagazo de la caña de azúcar es un subproducto rico en celulosa de la industria azucarera, generalmente utilizado como la principal fuente de combustible para los ingenios azucareros, una fuente de alimentación para el ganado de carne, un fertilizante y materiales de relleno sanitario. La caña de azúcar puede ser una materia prima potencial

porque se puede cultivar y cosechar durante todo el año, y una vez que se retira el jugo, el mismo bagazo se puede apilar y almacenar durante mucho tiempo (Figura 4), (Phinichka y Kaenthong, 2017).

Figura 4. Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*)



Fuente: (Guimarães *et al.*, 2009)

**1.2.11. Reino fungí.** El reino fungí cuenta con una de las más grandes colecciones de biodiversidad, morfología y ciclos de vida, con actividades ecológicas cruciales en todos los ecosistemas. Se pueden describir como organismos filamentosos en su mayoría, con crecimiento apical, eucarióticos, aclorófilos, heterótrofos por absorción, con reproducción asexual y sexual por medio de esporas, y con pared celular principalmente constituida por quitina o celulosa (Aguirre *et al.*, 2014). Los hongos generalmente crecen como filamentos (hifas) que se extienden solo en su extremo (Deacon, 2015).

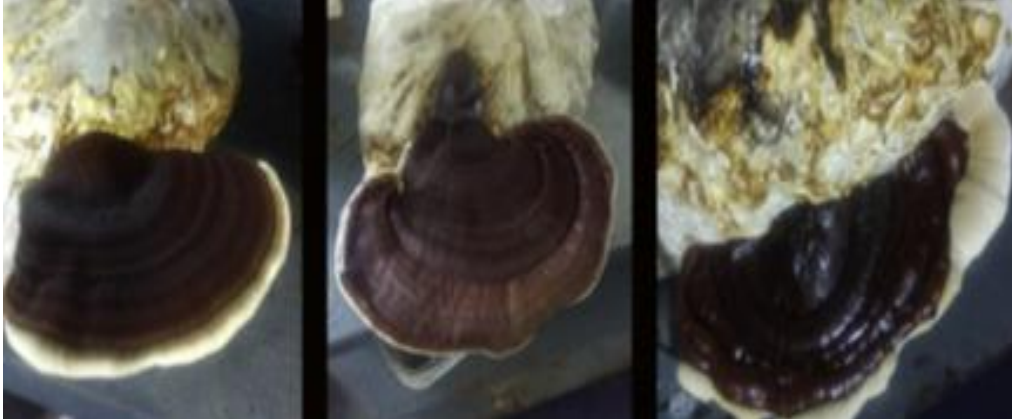
**Hongos de podredumbre blanca:** Los hongos de la podredumbre blanca secretan enzimas ligninolíticas, como la lignina peroxidasa, manganeso y la lacasa, y son capaces de degradar la lignina, un polímero aromático complejo de alto peso molecular (Xiao y Kondo, 2019)

***Ganoderma lucidum*:** Este hongo también conocido como Reishi, pertenece al género *Ganoderma spp.*; se caracteriza por tener un sistema hifal dimitico que le confiere dureza estructural e inusuales esporas de color café con doble pared. Causa putrefacción blanca en la madera por degradación de la lignina; crece libremente en bosques de casi todas las regiones cálidas de Asia y América, más en los climas subtropicales que en los templados.

Su crecimiento natural se desarrolla anualmente en el tronco de los árboles dañados o muertos, sobre todo roble, arce, olmo, sauce, magnolia, algarrobo y ciruelo (Figura 5), (Niño, 2013).



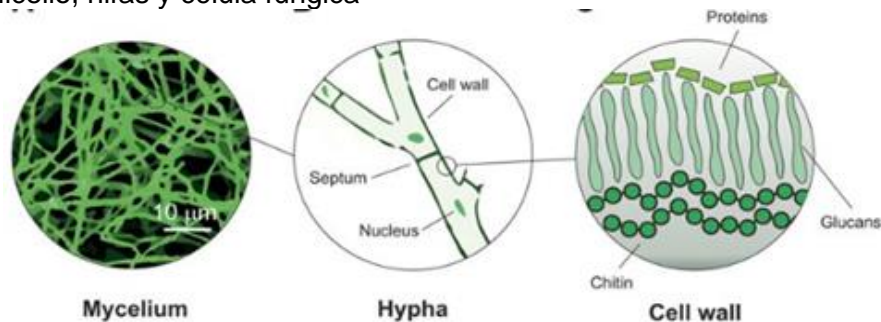
Figura 5. Cuerpos fructíferos de *G. lucidum*



Fuente: (Atila, 2018)

**Micelio:** Las hifas fúngicas se ramifican repetidamente detrás de sus puntas, dando lugar a una red llamada micelio. Un hongo puede tener un micelio único o varios tipos de ellos, a medida que experimenta las fases de su ciclo vital (Figura 6), (Deacon, 2015).

Figura 6. Micelio, hifas y célula fúngica



Fuente: (Haneef *et al.*, 2017)

**1.2.12. Propiedades mecánicas.** Estas propiedades describen cómo se comporta un material al ser expuesto a un esfuerzo como fatiga, un golpe, o desgaste (Askeland D., 1998).

**Resistencia a la flexión:** es la fuerza soportada por un material cuando se somete a un esfuerzo en tres o cuatro puntos para ser doblado sufriendo una deformación (Romero *et al.*, 2002). La relación que existe entre el esfuerzo y la deformación me da como resultado el módulo de flexión con unidades de fuerza (Wilson y Buffa, 2003).

**Resistencia a la compresión:** en este ensayo se aplica una fuerza compresiva a una velocidad moderada hasta causar la fractura del material (Núñez, Roca y Jorba, 2013).

**Resistencia a la tracción o tensión:** este ensayo ocurre cuando se aplica una fuerza de estiramiento en dos puntos causando una deformación. La relación de la fuerza entre la deformación genera el módulo de tracción (Albella *et al.*, 1993).

**Densidad aparente:** es un elemento importante en la caracterización de materiales compuestos pues nos indica el peso en una unidad espacial de este, internacionalmente se mide bajo la norma ASTM D792 o en medición de densidad compuesta la ASTM D1895 (Saba, Jawaid, y Sultan, 2018), pero de manera empírica se calcula obteniendo el peso de la muestra y su volumen con la ecuación:  $d=m/v$  como lo reportan Navia y Ayala, 2015 donde trabajaron un material a base de fibra de fique obteniendo un valor de  $0,40 \text{ g/cm}^3$  lo cual es un valor bajo y se reporta la idoneidad de este pues en este tipo de materiales el tener una menor densidad indica menor materia prima y por consiguiente menos gastos (Navia y Ayala, 2015).

**Relación de aspecto:** Es la relación que hay entre la longitud y el diámetro de una fibra, lo que permite predecir su comportamiento mecánico en propiedades como flexión, compresión y tensión (Meza y Siddique, 2019).

**1.2.13. Propiedades térmicas.** El análisis térmico es una técnica bien conocida para la caracterización de materiales e ingredientes en términos de investigaciones estructurales y de estabilidad. La calorimetría diferencial de barrido (DSC) y el análisis gravimétrico térmico (TGA) son las técnicas más utilizadas (Hsieh *et al.*, 2018).

**Calorimetría diferencial de barrido (DSC):** es un análisis térmico que se realiza en un calorímetro de barrido diferencial, en este se somete una muestra a un flujo de calor junto con una muestra en bandejas separadas y se mide la temperatura de las bandejas la cual se transforma en una diferencia de potencial que representa el flujo de calor (Humboldt University of Berlin, 2009). Se utilizan para medir cambios en la entalpía o el peso de diferentes materiales heterogéneos en función de la temperatura a lo largo del tiempo (Hsieh *et al.*, 2018).

**Análisis termogravimétrico (TGA):** mide la variación en el peso de una sustancia con variación de temperatura en una atmósfera controlada, para el ensayo se introduce la muestra en el equipo el cual consta de una bandeja que reposa sobre una balanza de precisión, esta se encuentra dentro de un horno el cual permite cambios de temperatura controlados, el resultado es una gráfica en donde el eje X puede contener valores de tiempo o temperatura y el eje Y de magnitud o porcentaje de peso (PerkinElmer Inc, 2015).

### 1.3. MARCO HISTÓRICO

**1.3.1. Residuos lignocelulósicos.** La materia vegetal lignocelulósica compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina cobra gran importancia en la industria y se la considera



valiosa ya que ha logrado tener diferentes aplicaciones en industrias como la papelera, textil, alimentaria, agrícola, energética incluso médica. Por su parte los residuos lignocelulósicos no son tan bien valorados y tienen una menor área de aplicación a pesar de su gran potencial (Tezcan y Atici, 2017).

**1.3.2. Materiales Compuestos.** Probablemente los materiales compuestos pioneros fueron reforzados con fibras naturales y producidos en los inicios de las civilizaciones, como los bloques de construcción de adobe de la antigua civilización egipcia, que son una masa de barro combinada con paja y secada al sol; estos primeros compuestos serían considerados amigables con el medio ambiente, debido al origen natural de sus elementos constituyentes. Incluso en el presente, este rudimentario procedimiento perdura en muchas regiones de escasos ingresos monetarios en el mundo (Monteiro *et al.*, 2012).

Las fibras naturales en bruto se utilizan en la industria para la elaboración de materiales compuestos con matrices de polímeros, como alternativa para reemplazar los sintéticos no degradables, ya que cuentan con una gran resistencia eléctrica, buenas propiedades mecánicas, son buenos aislantes termo-acústicos y presentan mayor resistencia a las fracturas, de manera similar a los reforzados con fibras de vidrio (Sanjay *et al.*, 2018). Jones *et al.*, (2017) realizaron una revisión sobre las características de ingeniería y la cinética de crecimiento de materiales basados en micelio fúngico; su estudio determinó que el micelio se utiliza en materiales compuestos y solo unos pocos materiales utilizan láminas puras de él, además de que puede plastificarse para aumentar su flexibilidad.

Afirman que los materiales manufacturados con micelio fúngico, tienen aplicaciones en industrias como la textil, construcción y electrónica, e incluso en la medicina, concluyendo que se necesita más investigación en el área para alcanzar todo el potencial del micelio.

Lelivelt *et al.*, (2015) proporcionan información sobre los métodos de producción de materiales a base de micelio. En este estudio se mencionan algunos pasos a seguir para la elaboración de materiales a partir de micelio fúngico y dan a conocer algunos valores de variables y condiciones que afectan el crecimiento del hongo, entre las que se encuentran la luz, el sustrato, flujo de aire, humedad y concentración de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. Se afirma que algunas de las condiciones pueden cambiar dependiendo del organismo vivo empleado; sin embargo, en su mayoría dichas condiciones son universales para los basidiomicetos. Finalizan declarando que en su documento hay espacio para muchas optimizaciones en el proceso y recomiendan más investigación para comprender si los materiales a base de micelio pueden ser de uso práctico.

En la investigación de materiales basados en micelio fúngico, se han fabricado también películas fibrosas mediante los hongos comestibles *Pleurotus ostreatus* y *Ganoderma lucidum*, cultivados por Haneef *et al.*, (2017) en celulosa y celulosa/papa-dextrosa (PBD). Lograron comprobar que el PBD era más fácilmente absorbido por el micelio, debido a su mayor concentración de azúcares; también comprobaron que las características fisicoquímicas de las películas dependen de las condiciones fisiológicas propias de cada

especie fúngica y de los sustratos usados en su alimentación. Al final de su estudio, las estructuras de fibras de micelio mostraron concentraciones diferentes de polisacáridos, lípidos, proteína y quitina, que reflejan alteraciones en las propiedades mecánicas del material y en su morfología. Manifiestan que los materiales compuestos a base de micelios o matriz fúngica se vuelven más rígidos cuando el sustrato de alimentación es más difícil de digerir.

Holt *et al.*, (2012) evaluaron seis mezclas de biomasa procesada de algodón, entre ellas la propia cáscara de la semilla, como sustrato para la colonización fúngica. Al obtener el material determinaron sus propiedades físicas, térmicas y de absorción de agua, mediante dos métodos de inoculación: líquido y sólido. Comprobaron que los tratamientos con inóculo líquido eran más fáciles de usar y proporcionaban una distribución uniforme del hongo en la formación del material. Mencionan que los materiales de micelio fúngico a base de algodón, son una alternativa viable al poliestireno utilizado en embalajes.

La utilización de micelios fúngicos como colonizadores de fibras naturales para producir nuevos materiales, se destaca por ser una tecnología nueva de gran aceptación, debido a que todos los componentes de dicho material son biodegradables (Arifin y Yusulf, 2013). Una de las empresas pioneras en la investigación, el desarrollo y la comercialización de materiales de micelio fúngico, es Ecovative Design, LLC; cuenta con 14 patentes relacionadas con la elaboración de materiales a base de hongos, de las cuales la mayoría se enfocan en materiales de micelio, que incluyen información que va desde el proceso para el cultivo en estado sólido de micelio en un sustrato lignocelulósico, los métodos de fabricación de elementos de micelio deshidratados y métodos de fabricación de materiales miceliales eléctricamente conductivos.

Materiales compuestos elaborados con una matriz de polietileno de alta densidad y reforzados con residuos lignocelulósicos como corcho (*Quercus suber L.*) y fibras de coco se han estudiado y se ha comprobado que las fibras naturales han logrado un aumento significativo en el módulo elástico y en la resistencia a la tracción (Fernández *et al.*, 2013)

Las fibras de fique (*Furcraea sp.*) también han sido objetivo de investigación. Se ha estudiado sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y térmicas, realizando diferentes pretratamientos en ellas (Muñoz, Hidalgo y Mina, 2014), algunos reportes han realizado combinaciones de fibra de fique con matrices de polietileno lineal de baja densidad y resina epoxi flexibles donde se ha estudiado en cómo influye su incorporación sobre las propiedades térmicas y mecánicas de las matrices poliméricas (Hidalgo y Correa, 2018).

Ayrlimis *et al.*, (2013) desarrollaron un material compuesto que daba uso a polietileno de aluminio (PEAL) mezclado con aserrín y cascarilla de arroz, para esto los residuos se tamizaron en malla 35/80 para ser secados hasta alcanzar una humedad de 0-1%, estos fueron mezclados junto con polipropileno maleico anhídrido (MAPE) y PEAL, la mezcla fue extruida (extrusor de doble tornillo) y el extruido se enfrió en agua, luego se secó hasta un 0-1% de humedad y se moldeó por compresión para obtener el producto.

Holt *et al.*, (2012), desarrollaron materiales de embalaje y aislamiento basado en residuos de algodón con una matriz fúngica, la materia prima (carpelos de algodón) fue triturada y tamizada para obtener partículas de 28-51 mm, 12-28 mm, 0,1-12 mm, 12-51 mm, 0,1-12;28-51 mm y 0,1-51 mm, se mezclaron las partículas de carpelos, el casco de la semilla de algodón, almidón y yeso en proporciones que no son reportadas por la empresa Ecovative Design, tomando dos tipos de inóculo uno en grano y otro en líquido para obtener un total de 12 tratamientos, el material se pasteurizó a 115°C durante 28 minutos, luego se enfrió hasta los 35°C, se inoculó el hongo *Ganoderma sp.*, se vertió en moldes y se incubó a 21°C durante 5 días, finalmente se inactivó el hongo a 60°C durante 8 horas. También se reporta la elaboración de un material a base de residuos agrícolas mezclados con ácido poliláctico (PLA) y resina de pino, para trabajar con la matriz conocida como PPLA, las fibras obtenidas de los residuos de semillas de palma, miden entre 0,5 y 1,5 cm y fueron mezcladas en porcentajes de 5 % 7,5 % y 10 % con el PLA y la resina, se vertieron en moldes y se secaron a temperatura ambiente durante 1 hora para obtener el producto final. (Santos, Silva y Alves, 2017).

Se ha reportado la elaboración de materiales termoplásticos a partir de residuos de cáñamo y polietileno de alta densidad; el proceso inicia con la trituración de los residuos para obtener microfibras que luego son mezcladas con plastificante, en paralelo se obtienen nano fibras por tratamiento térmico, mecánico, químico y enzimático, para la obtención del material compuesto se mezclaron las microfibras en proporciones de 30 % 40 % y 60 % y nano fibras por su limitada cantidad solo en 30 %, fueron extruidas y finalmente se obtuvieron los especímenes por moldeo por compresión (Merkel *et al.*, 2014)

Recientemente se ha trabajado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en un material compuesto por residuos del cultivo de trigo (*Triticum sp.*), un micelio fúngico (*Pleurotus sp.*), y un recubrimiento o película comestible (carragenina, quitosano y goma xantana). Este material de base biológica se elaboró con el fin de evaluar sus propiedades físicas y mecánicas para compararlas con el poliestireno expandido conocido como EPS. Se realizaron tres tratamientos, estos se diferencian por el tipo de recubrimiento aplicado, para comparar con el EPS se usó la ASTM C 578-04 en donde se clasifica el tipo de EPS según sus propiedades físicas y mecánicas (López *et al.*, 2016).

En otra investigación se evaluaron las propiedades de un material elaborado con poliuretano y fibras naturales de bagazo de caña, sisal y cascarilla de arroz, su proceso inicia con un lavado a 80 °C por una hora y secado por 5 horas a 100 °C, se realizó un pretratamiento con hidróxido de sodio (1,5 % v/v) y peróxido de hidrógeno (30 % v/v) durante 48 horas a temperatura ambiente, se lavó hasta un pH neutro, se escurrió y se secó a 80 °C durante 6 horas. Para la conformación del material se preparó una mezcla de 15,0 g de polietilenglicol, 1,0 ml de octoato estannoso, 1,0 ml de glicerol y 1,0 ml de polidimetilsiloxano, esta se mezcló con 3 gramos de cada fibra y sus mezclas binarias y las tres en conjunto, se vertió en recipientes de 10x10x5cm, se cubrió con una película de PVC y se dejó reposar durante 48 horas (Otto *et al.*, 2017).

Sánchez *et al.*, (2018) estudiaron la capacidad de tres residuos lignocelulósicos (cáscara

de almendra, cáscara de arroz y plantas marinas) para formar materiales compuestos mezclándolos con PHB, el proceso comenzó con triturar y tamizar las fibras para obtener partículas uniformes, se secaron por 24 horas a 60 °C, (adicional a esto las plantas marinas se trataron con ácido acético a 3 % v/v), luego se trataron con hidróxido de sodio (5 % p/v) y peróxido de hidrógeno (10 % p/v) a 80 °C con dos repeticiones (eliminando lignina y hemicelulosa) para obtener fibras de celulosa puras, se secaron a 60 °C por 24 horas y se mezclaron con el PHB, la mezcla fue extruida (180 °C para evitar degradación) y el producto previamente calentado se prensó a 3 bares por dos minutos para formar láminas de 35 mm

## 2. METODOLOGÍA

La metodología se dividió en dos etapas. La primera consistió en la elaboración de un sustrato para el crecimiento del hongo *G. lucidum* en residuos lignocelulósicos de coco, fique y caña de azúcar, posteriormente se evaluó el crecimiento radial en un periodo de tiempo y finalmente se calculó la velocidad de crecimiento.

En la segunda etapa se desarrolló un material compuesto a partir de una matriz fúngica y un refuerzo lignocelulósico. Se analizaron sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas.

### 2.1. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CRECIMIENTO DE *G. LUCIDUM* EN LOS RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS

**2.1.1. Obtención de las materias primas.** Las materias primas utilizadas fueron adquiridas de diferentes regiones del departamento del Cauca y del comercio local y nacional.

**Fibras de coco:** La fibra de coco fue suministrada por la empresa Sustitutos Ecológicos de la ciudad de Medellín y también se obtuvo del comercio local en la plaza de mercado del barrio Bolívar (Figura 7 c).

**Fibras de fique:** el bagazo de fique fue recolectado de cultivos pertenecientes a la Asociación de Fiqueros de Jambaló (AFITEJ); y de cultivos ubicados en el resguardo indígena de Paniquita (Totoró, Cauca) (Figura 7 a).

**Bagazo de caña:** el bagazo de caña fue recolectado de cultivos pertenecientes a agricultores de la vereda El Porvenir del municipio de Argelia (Cauca) (Figura 7 b).

Figura 7. Materias primas recolectadas



a) Bagazo de fique b) Bagazo de caña c) Fibra de coco

**Hongo *Ganoderma lucidum*:** el hongo *G. lucidum*, fue adquirido en la empresa Setas de Sietcha. Pasados 21 días el hongo completó su crecimiento en la caja de petri inicial; a partir de allí se realizaron 20 réplicas en agar papa dextrosa (PDA) para mantenerlas guardadas en refrigeración (4°C) hasta que fuera necesario activarlas en PDA a 28 °C durante 10 días para su posterior uso en la investigación.

**2.1.2. Adecuación de materas primas.** La adecuación inicial de los residuos lignocelulósicos abarco procesos de reducción de tamaño y lavados de la materia prima.

**Fibra de coco:** Las fibras largas de coco de aproximadamente 30 cm fueron sometidas a un proceso de corte con tijeras hasta obtener longitudes no superiores a 10 cm con el fin de facilitar el posterior proceso de molienda (Figura 8 b).

**Bagazo de fique:** Se inició por un lavado del residuo lignocelulósico con flujo de agua constante a un caudal de 24 L/min con el fin de remover las saponinas presentes. Se realizó el lavado hasta que no se observó espuma saliente del residuo. Posteriormente se sometió al bagazo de fique a un secado a 50 °C durante 24 horas. Una vez seco se realizaron cortes con tijeras para facilitar el proceso de molienda (Figura 8 a).

Figura 8. Adecuación de los residuos lignocelulósicos



a) Adecuación del bagazo de fique      b) Adecuación de la fibra de coco

**Bagazo de caña de azúcar:** No se realizaron procesos de adecuación previos a la molienda.

**2.1.3. Molienda y tamizado de los residuos lignocelulósicos.** Se llevó cada uno de los residuos lignocelulósicos cortos al molino de martillos provisto de una criba de 1,35 mm de diámetro (Figura 9). El proceso de tamizado se realizó en una tamizadora eléctrica con un

juego de tamices estándar ASTM E11, se depositó cada una de las muestras de fibras obtenidas en la molienda en el tamiz superior de un juego de tamices con números de mallas 10, 16, 30, 50 y fondos, ubicándolos de forma descendente y asegurándolos en la tamizadora (Figura 10). posteriormente se tomaron muestras de los residuos lignocelulósicos retenidos por las mallas con aberturas de 1,18; 0,6 y 0,3 mm además de los fondos. (Cuadro 1).

Para el bagazo de fique se realizó un proceso posterior al tamizado en el cual se lavó nuevamente los residuos con abundante agua (Figura 11), buscando remover contenidos de saponina residual, se escurrió y se dejó secar a 50°C durante 24 horas en horno de convección forzada.

Figura 9. Molienda de residuos lignocelulósicos



a) Molienda de residuos b) Criba utilizada en el proceso

Cuadro 1. Relación número de tamiz y abertura

Número de malla de tamiz	Abertura del tamiz (mm)	Abreviatura
16	1,18	T16
30	0,6	T30
50	0,3	T50

**2.1.4. Caracterización morfológica de los sustratos.** La caracterización Morfológica se evaluó con microscopía óptica de alta resolución MOAR mediante uso de estereoscopio (Nikon Model C-DSS115) y la cámara digital (Nikon DS-2Mv 2Mp) (Figura 12), por medio del software NIS Element F se capturaron imágenes de los residuos lignocelulósicos retenidos por las mallas de numero 16, 30, 50 (Cuadro 1) y se usó el programa Image Pro Analyzer para exportar los datos de diámetro y longitud. Se realizo el cálculo de la relación



de aspecto mediante la relación de la longitud sobre el diámetro de cada una de las fibras analizadas.

Figura 10. Equipos utilizados en el proceso de tamizaje



Figura 11. Lavado de bagazo de fique tamizado y molido



**2.1.5. Caracterización físico química de la materia prima.** Se realizó esta caracterización con el fin de determinar los componentes de los tres residuos lignocelulósicos.



**2.1.5.1. Determinación de pH.** Se determinó el pH de los sustratos según la metodología mencionada en la norma EN 13037 en donde se inició por humedecer el sustrato en un 70 %. Posteriormente se pesaron 20 g de muestra y se le adicionaron 100 mL de agua destilada, se mezcló y se dejó reposar durante 30 minutos y se midió el pH mediante un phmetro (Figura 13).

Figura 12. Sistema de observación



Figura 13. Medición de pH



**2.1.5.2. Determinación de la composición química de los residuos lignocelulósicos.** La composición química de los residuos lignocelulósicos fue determinada de acuerdo a la metodología descrita en la norma AOAC a través de la contratación de servicios externos de laboratorio. Los parámetros que se tuvieron en cuenta fueron los siguientes.

**Materia orgánica total y el carbono hidrosoluble:** se determinaron por medio de la oxidación del carbono orgánico por una mezcla oxidante de dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado.

**Porcentaje de humedad:** se determinó por método termogravimétrico, por medio de un dispositivo térmico con circulación forzada de aire para eliminar o extraer el agua de la muestra.

**Cenizas:** se usó un método basado en la destrucción de la materia orgánica presente en la muestra por calcinación y determinación gravimétrica del residuo. Por medio de un soxhlet por separación sólido-líquido, se determinó la fracción de extracto.

**Fibra cruda:** se hizo por la cuantificación de la pérdida de masa posterior a la incineración del residuo orgánico por digestión ácida y básica. En cuanto a la energía bruta se empleó una bomba calorimétrica en la que las fibras liberarán energía en forma de calor por la combustión.

**Fibra detergente neutra, ácida y lignina:** se aplicó el método de Van Soest secuencial, con el uso de un detergente neutro (sulfato lauril) para el primero, uno ácido (bromuro de cetil trimetil amonio) para el segundo y ácido sulfúrico para la lignina, que disolvió la celulosa del residuo ácido detergente, que contiene principalmente lignocelulosa.

**Fósforo, azufre, calcio, magnesio, potasio, hierro, cobre, manganeso y zinc:** por medio de digestión por vía húmeda se hizo la descomposición de la muestra, empleando ácidos oxidantes solos o en mezclas en sistemas abiertos a presión atmosférica o cerrados bajo presión.

**2.1.6. Preparación del medio de cultivo e inoculación del hongo.** Para ello fue necesario realizar algunos ensayos previos para la adaptación del hongo.

**Ensayos preliminares:** para la elaboración de unos medios de cultivo adecuados para el crecimiento micelial de *G. lucidum* se preparó medio mandels modificado el cual debía contener como fuente de carbono los residuos lignocelulósicos de coco, fique y caña de azúcar. Se experimentó inicialmente con fibras hidratadas en reposo por 240 minutos para que se formase un sobrenadante y precipitado que contuviese material lignocelulósico, de igual forma se realizaron ensayos con fibras sin hidratación previa. Esto con el fin de determinar con cual se lograba una mejor dispersión de fibras de material lignocelulósico en los medios de cultivo.

Posteriormente se realizó ensayos cambiando la fuente de nitrógeno del medio mandels, en donde el fosfato monoamónico ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ) fue reemplazado por peptona bacteriana, sulfato de amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) o cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) con el fin de observar cual fuente de nitrógeno generaba un mejor crecimiento micelial.

También se realizaron blancos para comprobar cómo se afectaba el crecimiento de *G. lucidum* en presencia o ausencia de factores como nutrientes y residuos lignocelulósicos.

Estos medios estaban elaborados sólo con las sales del medio mandels y sin residuos lignocelulósicos como fuente de carbono. De igual forma se inoculó medios de cultivo elaborados sólo con material lignocelulósico sin ningún tipo de nutriente adicional y una prueba más en donde había presencia tanto de nutrientes como de residuos lignocelulósicos. Fueron necesarios los ensayos preliminares para obtener medios en donde se observó un crecimiento óptimo de *G. lucidum*.

**Preparación del medio de cultivo:** En un recipiente se pesó las cantidades de reactivos correspondientes (Cuadro 2) con la ayuda de la balanza analítica. Posteriormente en el Erlenmeyer de 1000 mL se diluyeron los reactivos, realizando la dilución compuesto a compuesto agregando pequeñas cantidades de agua destilada para cada uno y mezclando para su completa disolución. Una vez todos los reactivos fueron diluidos se completó con agua destilada hasta el volumen previamente indicado. En este momento se agregó el residuo lignocelulósico proveniente de los fondos generados por la malla 50 en el proceso de tamizado. Se dejó calentar hasta 70°C y se agregó el agar-agar llevándolo hasta ebullición en plancha de calentamiento con agitación (IKA 6), hasta que el medio tomó un aspecto cristalino. Se retiró de la plancha y se tapó la boca del Erlenmeyer con algodón y papel aluminio.

Posteriormente se esterilizó en autoclave el material de vidrio (cajas de Petri) previamente empacado en papel Kraft junto con el medio de cultivo en la autoclave (All american).

El procedimiento se realizó a 121°C por 15 minutos. Una vez terminó el proceso, las cajas de Petri se secaron en horno mientras que se enfrió el medio de cultivo esterilizado hasta aproximadamente 50°C. Una vez frío se procedió a verter cada medio en las cajas de Petri estériles en la cámara de flujo laminar y con el mechero encendido dentro de ella. Cuando el medio solidificó, se taparon las cajas y se forraron con una película plástica delgada. Se almacenaron colocándolas en posición invertida hasta la posterior siembra del hongo. La elaboración de los medios se hizo por separado para cada uno de los tres residuos lignocelulósicos. (Cuadro 2).

Cuadro 2. Composición del medio de cultivo

Reactivo	Cantidad por 1000 mL
Agar-Agar	15 g
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2 g
CaCl <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	0,3 g
MgSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	0,3 g
Tween 80	0,1 g
FeSO <sub>4</sub> . 6H <sub>2</sub> O	5 mg
MnSO <sub>4</sub> . H <sub>2</sub> O	16 mg
ZnCl <sub>2</sub> . 2H <sub>2</sub> O	17 mg
CoCl <sub>2</sub> . 6H <sub>2</sub> O	2 mg
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1 g
Residuo lignocelulósico	20 g

**2.1.7. Inoculación y medición del crecimiento radial.** Los medios se mantuvieron a temperatura ambiente durante dos días para verificar que no se contaminaron al momento de servirlos. Una vez transcurridos estos dos días se procedió a la inoculación de las cajas de Petri con *Ganoderma lucidum*. El procedimiento se realizó en cámara de flujo laminar con todas las medidas de asepsia tomando discos de 9 mm de diámetro de cultivos de los hongos en agar PDA y colocándolos en el centro geométrico de las cajas de Petri. Se trabajaron 10 repeticiones para cada muestra obteniendo un total de 30 cajas (Pereira *et al.*, 2014).

Cuadro 3. Codificación de tratamientos para crecimiento radial.

Abreviatura	Tratamiento
GC	<i>G. lucidum</i> desarrollado en sustrato elaborado con de fibra de coco
GF	<i>G. lucidum</i> desarrollado en sustrato elaborado con bagazo de fique
GA	<i>G. lucidum</i> desarrollado en sustrato elaborado con bagazo de caña

Las muestras de *G. lucidum* con los 3 residuos lignocelulósicos se codificaron (Cuadro 3) y se realizó seguimiento cada 12 horas hasta invasión total de la caja de petri (Atuhaire *et al.*, 016). Se realizó seguimiento fotográfico y las fotos tomadas se midieron con el software image J. Con el fin de determinar la velocidad de crecimiento por hora. Los datos se analizaron con el software Origin Pro 2016.

**2.1.8. Diseño experimental en la fase 1.** Se utilizó un diseño unifactorial completamente aleatorizado por decuplicado, teniendo como factor el tipo de fibra (bagazo de fique, bagazo de caña y fibra de coco) y como variable de respuesta la velocidad de crecimiento del hongo. El tratamiento estadístico incluyó un análisis de varianza ANOVA con comparación de supuestos como normalidad (Shapiro-Wilks) y homogeneidad de varianzas y posteriormente se realizó una prueba Post Hoc de Tukey (Cuadro 4).

Cuadro 4. Diseño experimental de la fase 1.

Factor	Niveles	Variable de respuesta
Residuo lignocelulósico	Fibra de coco	Velocidad de crecimiento micelial
	Bagazo de fique	
	Bagazo de caña de azúcar	

## 2.2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS Y TÉRMICAS DEL MATERIAL COMPUESTO OBTENIDO

**2.2.1. Elaboración del material compuesto.** En la elaboración del material compuesto fue necesario preparar un inóculo y un sustrato en donde el hongo colonizó hasta obtener un material compacto.

**Preparación del inóculo:** Se usaron granos de cebada los cuales fueron lavados con abundante agua de clorada y posteriormente se dejaron en remojo en agua destilada por 12 horas, una vez cumplido el tiempo se procedió a hervir los granos entre 10 y 15 minutos, luego fueron escurridos por 2 horas y se realizó un secado superficial en papel. Los granos tratados se vertieron en bolsas de polipropileno y, se esterilizaron (121 °C durante 30 minutos) (Ardón, 2007). Después de ser esterilizados se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente y se los inoculó en cámara de flujo laminar con trozos de micelio fúngico de 5x5 mm provenientes de placas de Petri con agar PDA. Los granos inoculados se mantuvieron en incubación a temperatura ambiente en oscuridad total por 5 días.

**Preparación del sustrato:** Se tomó 3 gramos de fibras de coco, bagazo de fique y bagazo de caña de azúcar previamente adecuados (molienda, lavado, tamizado) y se determinó el contenido de humedad inicial. A continuación, se realizó un balance de materia para determinar la cantidad de agua necesaria a adicionar para lograr una humedad final del 70 % en los residuos lignocelulósicos. Posteriormente se preparó una solución basal (Cuadro 5) para enriquecer los residuos con el agua determinada en el balance másico.

Cuadro 5. Composición solución basal

Compuesto	Cantidad
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.2 %
CaCl <sub>2</sub>	0.03 %
MgSO <sub>4</sub>	0.03 %
FeSO <sub>4</sub>	5*10 <sup>-4</sup> %
MnSO <sub>4</sub>	1.57*10 <sup>-3</sup> %
ZnCl <sub>2</sub>	1.71*10 <sup>-3</sup> %
CuCl <sub>2</sub>	2*10 <sup>-4</sup> %
Peptona	4, 6 g

Balance global

$$A + B = C \quad (\text{Ec. 1})$$

Balance composicional de agua

$$A * (H_o + B * (100 \%)) = C * H_f \quad (\text{Ec. 2})$$

Despejando B desde 1 y 2

$$B = \frac{(A * (H_f)) - (A * (H_o))}{30 \%} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

A: Cantidad de residuo lignocelulósico;

B: Cantidad de agua en gramos;

C: Cantidad de residuo lignocelulósico húmedo;

H<sub>o</sub>: Humedad inicial de los residuos lignocelulósicos

H<sub>f</sub>: Humedad final de los residuos lignocelulósicos húmedos la cual debe ser del 70 %.

**Inoculación del sustrato:** se tomaron 35 gramos de bagazo de fique tamiz 16 y tamiz 50 y fibra de coco tamiz 16 y tamiz 50 por separado, se humedecieron por aspersion con la solución basal con la ayuda de un frasco de plástico aspersor, de esta manera los tres residuos lignocelulosicos quedaron con el mismo porcentaje de humedad. Se mezcló con una espátula una por una hasta que cada muestra quedó con la humedad requerida del 70%.

Después de agregar la solución basal a los tres tratamientos se tomaron humedades finales con una balanza de humedad, para verificar que la humedad final sea la requerida. Más adelante cada tratamiento se colocó en moldes de polipropileno rectangulares con las siguientes dimensiones: 10 cm de ancho por 20 cm de largo y 4 cm de alto, además, se utilizaron moldes circulares con 7.62 cm de diámetro y 3 cm de alto. Se taparon, se envolvieron en papel kraft y papel aluminio para ser esterilizadas en una autoclave a 121 °C durante 15 minutos. Después de haber esterilizado los moldes con la fibra humedecida con la solución basal, se procedió a inocular con granos de cebada colonizados previamente con *G. lucidum*.

La inoculación se hizo al 20 % en peso, a 35 gramos de residuo lignocelulósico se le agregaron 7 gramos de inóculo en grano debidamente distribuidos en las esquinas sobre las paredes de la caja, en la parte central y en el fondo con la ayuda de una espátula. La siembra se realizó dentro de una cámara de flujo laminar teniendo en cuenta todas las precauciones y normas de asepsia. Posterior a ello las cajas de polipropileno fueron cubiertas con una película plástica delgada para ser llevadas a la incubadora a 28 °C. Se incubó durante 3 semanas y posteriormente se procedió a hacer el desmonte del material. Los bloques de material se ubicaron en bandejas y se secaron a 60 °C durante 24 horas.

**2.2.2. Caracterización del material por sus propiedades mecánicas.** Las pruebas mecánicas que se evaluaron fueron compresión, flexión y densidad.

**Compresión:** Se empleó el procedimiento descrito en la norma ASTM D1621. En donde se equipó una máquina universal de ensayos (Figura 14) con una placa inferior de 11.5 cm de diámetro y una placa superior móvil del mismo diámetro; el espécimen utilizado fue un cilindro con un área superficial de 45,6 cm<sup>2</sup>; sus dimensiones fueron 7,62 cm de diámetro y 3 cm de alto. Se trabajó a una velocidad de 3 mm/min hasta alcanzar una deformación máxima del 13% (ASTM, 2016).

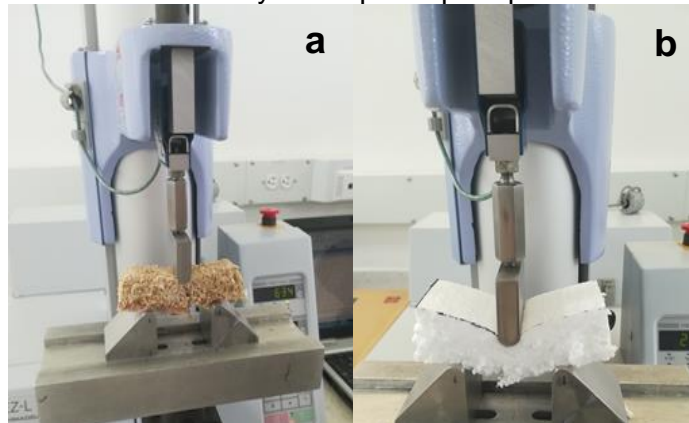
Figura 14. Máquina universal de ensayos adaptada para pruebas de compresión



**Flexión:** La prueba se desarrolló bajo los parámetros de la norma ASTM C203 en una máquina universal de ensayos (Figura 15), equipada de una mordaza inferior o soporte de flexión y de un punzón de flexión móvil; las muestras de 11 cm de largo, 2,5 cm de alto y 3,5 cm de ancho se colocaron sobre la mordaza de forma que quedaran centradas y se les aplicó una fuerza por medio del punzón, hasta alcanzar su fractura. Se hicieron 10 réplicas (ASTM, 2017). Los especímenes con las dimensiones mencionadas en la norma se obtuvieron mediante cortes a los bloques de material compuesto mediante una sierra rotatoria.

**Densidad aparente:** se siguió la norma ASTM D3748, que cubre los procedimientos básicos de prueba para la determinación de las propiedades físicas y el informe de datos para plásticos celulares rígidos de alta densidad (ASTM, 2019); por medio de la norma ASTM D1622 se determinó la densidad aparente, para lo cual el espécimen tuvo una forma cuyo volumen pudo ser calculado fácilmente y no inferior a 16,4 cm<sup>3</sup>. Se precisó el alto, largo y ancho con un pie de rey y el peso se tomó con una balanza analítica con precisión de +/- 0,1 %. La densidad se determinó por la relación masa/volumen. Se cortaron tres submuestras de prueba separadas de una de mayor tamaño (ASTM, 2014).

Figura 15. Máquina universal de ensayos adaptada para pruebas de flexión



a) Ensayo de flexión de biocompuesto      b) Ensayo de flexión de EPS

**2.2.3. Diseño experimental de la fase 2.** Se utilizó un diseño unifactorial completamente aleatorizado por decuplicado, teniendo como factor el tratamiento (bagazo de caña) T50, T16 y el EPS, como variable de respuesta el esfuerzo de compresión y flexión.

El tratamiento estadístico incluyó un análisis de varianza ANOVA con comparación de supuestos como normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas y posteriormente se realizó una prueba Post Hoc de Games-Howell para varianzas no homogéneas. (Cuadro 6).

Cuadro 6. Diseño experimental de la fase 2

Factor	Niveles	Variable de respuesta
Tratamiento	Bagazo de caña	Esfuerzo de compresión y flexión

**2.2.4. Caracterización de las propiedades térmicas.** Se utilizaron 4 muestras para la medición de las propiedades térmicas de las cuales 3 de ellas involucraban material orgánico y una se trataba de un material sintético (Cuadro 7).

**Calorimetría diferencial de barrido:** esta prueba se realizó bajo la norma ASTM D3418, que cubre la determinación de temperaturas de transición y entalpías de fusión y cristalización de polímeros, mediante calorimetría de barrido diferencial. Para determinar las temperaturas de transición vítrea ( $T_g$ ), de cristalización y de fusión ( $T_m$ ), se tomaron muestras de 10 mg de material espumado previamente acondicionadas. Con un calorímetro, se realizaron en total tres ciclos entre calentamiento y enfriamiento intercalados (calentamiento-enfriamiento-calentamiento) con temperaturas de -60 a 255 °C a una relación de 20 °C/min. Al final del primer ciclo se mantuvo el material a una temperatura de 255 °C por cinco minutos. Al final del ciclo de enfriamiento el material se sometió a una temperatura de -60 °C por cinco minutos y posteriormente se completa el tercer ciclo (ASTM, 2015).

**Análisis termogravimétrico:** se hizo mediante el método mencionado en la norma ASTM E1131, que permite determinar la cantidad de materia altamente volátil, volátil media, material combustible y contenido de cenizas de los compuestos. Las muestras previamente acondicionadas se sometieron a temperaturas entre 30 y 600°C a una relación de 20°C/min (ASTM, 2014).

Cuadro 7. Codificación para la realización de las pruebas térmicas

Abreviatura	Tratamiento
GA	<i>G. lucidum</i> desarrollado en sustrato elaborado con bagazo de caña de azúcar
BA	Bagazo de caña de azúcar
G	<i>Ganoderma Lucidum</i>
EPS	Poliestireno expandido



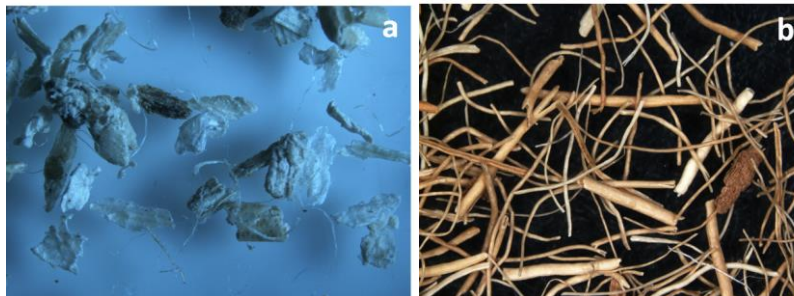
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE CRECIMIENTO DE *GANODERMA LUCIDUM* EN LAS FIBRAS DE COCO, BAGAZO DE FIQUE Y BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

**3.1.1. Caracterización morfológica de los sustratos.** Los resultados obtenidos de la determinación de la relación de aspecto muestran que se obtuvo valores similares en cuanto a tipo de tamiz utilizado; es decir, los resultados fueron similares en cuanto a abertura de tamiz más no en cuanto al tipo de residuo lignocelulósico evaluado (Cuadro 8). En los tratamientos que involucran al coco como residuo lignocelulósico se obtuvo valores mayores de relación de aspecto entre 20 y 30, mientras que en bagazo de fique se evidencia valores no superiores a 3, para bagazo de caña se obtuvo una relación de aspecto de 6 a 8. Este comportamiento puede explicarse dado a que los residuos de coco son fibras en las cuales la longitud es relativamente mayor que su diámetro; por otro lado, los residuos de bagazo de fique y caña son partículas en donde la longitud y el diámetro no difieren en gran medida, (Figura 16).

Los valores de la relación de aspecto encontrados para los residuos lignocelulósicos pueden dar una posible explicación al comportamiento de las resistencias a la compresión y a la flexión al ser utilizadas como refuerzo de una matriz. Estudios han demostrado que los materiales compuestos aumentan su resistencia a la tracción a medida que aumenta la relación de aspecto hasta alcanzar un valor de 20; después de este valor la resistencia a la tracción tiende a volverse constante sin importar un aumento en la relación de aspecto (Tian *et al.*, 2014).

Figura 16. Residuos lignocelulósicos observados con estereoscopio



a) Bagazo de fique retenido por el tamiz con una abertura de 1.18 mm. b) Fibras de coco retenidas por el tamiz con una abertura de 1.18 mm.

Por otra parte, se considera que a medida que aumenta la relación de aspecto y con ella la resistencia a la flexión, la resistencia a la compresión disminuye (Cai *et al.*, 2015). En estudios realizados en fibras naturales como las de bambú y eucalipto con relaciones de aspecto de 51 se mejoró la eficiencia como refuerzo, se encontró que a una relación de aspecto más alta generalmente mejora la resistencia a la flexión y la resistencia a la fractura (Da Costa *et al.*, 2014).

En este sentido, considerando solamente la relación de aspecto, un material de matriz fúngica reforzado con residuos de coco tiene mayor resistencia a la flexión que uno en el que se emplea partículas de bagazo de fique o caña. Sin embargo, el material con bagazo de fique o caña en su estructura podría considerarse una buena opción si se busca una mayor resistencia a la compresión (Da Costa *et al.*, 2014).

Para la elaboración de los medios de cultivo se utilizaron los fondos de la malla 50 de cada residuo lignocelulósico debido al tamaño de partícula que permite una mejor dispersión en el medio; para la elaboración del material compuesto biodegradable se usaron las fibras T16 y T50 ya que las relaciones de aspecto fueron muy similares entre sí y por ello se eligieron los extremos.

Cuadro 8. Resultados de la relación de aspecto evaluada

Tratamiento	Abertura ASTM E-11	Tamiz	Promedio	Desviación
			(L/D)	
T16 Bagazo Fique		1,18 mm	2,843	±1,485
T30 Bagazo Fique		600 µm	2,631	±1,240
T50 Bagazo Fique		250 µm	2,795	±1,567
Fondos Bagazo Fique		-	2,389	±1,069
T16 Fibra coco		1,18 mm	27,768	±9,166
T30 Fibra coco		600 µm	20,876	±10,953
T50 Fibra coco		250 µm	26,591	±7,942
Fondos Fibra coco		-	19,378	±7,624
T16 Bagazo caña		1,18 mm	8,534	±4,233
T30 Bagazo caña		600 µm	8,308	±4,046
T50 bagazo caña		250 µm	6,669	±4,304
fondos bagazo caña		-	-	-

**3.1.2. Caracterización fisicoquímica de la materia prima.** A continuación, se presentan los resultados de pH de las muestras y de análisis proximal de los 3 residuos lignocelulósicos.

**3.1.2.1. Determinación de pH.** Los valores óptimos de pH para el crecimiento de *G. lucidum* se encuentran entre 4.5 y 5,5 (Rodríguez y Jaramillo, 2005). Debido a la naturaleza de los sustratos y sus pHs iniciales (Cuadro 9) se ajustó un pH final de 5,5 para todos los ensayos (Torres, Quintero, y Garcés, 2011). Para el procedimiento se utilizó carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) para estimular el crecimiento hifal (Rodríguez y Jaramillo, 2005).

**3.1.3.2. Composición química de los residuos lignocelulósicos.** Se presentan los resultados obtenidos por los laboratorios de bromatología de la Universidad de Nariño y el laboratorio de servicios analíticos del Centro Internacional de Agricultura Tropical respecto a la composición proximal de los 3 residuos lignocelulósicos, bagazo de fique, bagazo de caña de azúcar y fibras de mesocarpio de coco (cuadro 10).

Cuadro 9. Ensayos de pH realizados

Ensayo	pH inicial	Desviación	pH final
GC T16	5,380	±0,010	5,5
GC T50	5,410	±0,017	5,5
GF T16	5,468	±0,013	5,5
GF T50	4,732	±0,011	5,5
GA T16	4,870	±0,008	5,5
GA T50	4,890	±0,006	5,5

Cuadro 10. Resumen análisis fisicoquímicos de los residuos lignocelulósicos

Análisis	Residuo lignocelulósico (% BS)		
	Fibra Coco	Bagazo Fique	Bagazo Caña
Hemicelulosa	10,48	7,5	27,2
Celulosa	65,94	38,67	48,8
Lignina	13,31	5,93	7,0
Extracto Etéreo	0,15	3,07	2,8
Proteína	1,15	5,82	1,4
Fibra Cruda	76,18	42,16	55,8
Fibra Detergente Neutro	90,8	52,86	154,5
Fibra Detergente Ácido	80,32	45,36	64,7

**3.1.4. Resultados elaboración del medio de cultivo, inoculación y velocidad de crecimiento.** El análisis estadístico (shapiro wilk y Tukey) del crecimiento radial de los datos analizados reportan que si hay diferencias significativas ( $\alpha=0,05$ ) en los tratamientos analizados, muestra que el tipo de residuo lignocelulósico empleado y la interacción entre estos influyen en la velocidad de crecimiento micelial. Se observó 2 comportamientos diferentes. En donde los tratamientos de *G. lucidum* en bagazo de caña (GA) y fibra de coco (GC) se comportaron de manera similar mientras que el tratamiento de *G. lucidum* con bagazo de fique (GF) es distinto (Cuadro 11-12).

Cuadro 11. Análisis estadístico

Comparaciones múltiples							
Variable dependiente: Velocidad de crecimiento radial							
Residuo lignocelulósico		Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%		
					Límite inferior	Límite superior	
HSD Tukey	Coco	Fique	,26879100*	0,02716804	0,000	0,2014301	0,3361519
		Caña	,07589300*	0,02716804	0,025	0,0085321	0,1432539
	Fique	Coco	-,26879100*	0,02716804	0,000	-0,336151	-0,201431
		Caña	-,1928980*	0,02716804	0,000	-0,260258	-0,125537
	Caña	Coco	-,0758930*	0,02716804	0,025	-0,143253	-0,008532
		Fique	,19289800*	0,02716804	0,000	0,1255371	0,2602589

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Cuadro 12. Velocidades de crecimiento micelial

Tratamiento	Velocidad de crecimiento promedio (mm/h)	Desviación
GF	0,1427	±0,01
GC	0,4115	±0,10
GA	0,3356	±0,02

Los hongos como organismos quimio heterótrofos necesitan compuestos orgánicos para transformarlos en energía y tomar el carbono necesario para su desarrollo (Tortora, Funke y Case, 2007), es por ello que fueron usados como fuente primaria de carbono los residuos lignocelulósicos ya que por ser orgánicos contienen un alto porcentaje de carbono (Singh y Pandey, 2009).

Se ha confirmado que cuando la relación carbono nitrógeno (C/N) es menor a 50 el hongo no puede colonizar por completo el sustrato ni dar una fructificación exitosa (Rashad *et al.*, 2019), este factor incidió en las velocidades promedio de crecimiento (Figura 18), de la cepa fúngica evaluada ya que GC obtuvo una velocidad promedio 0,4115 mm/h debido a que la relación C/N del medio con este residuo fue de 51,6 seguido del bagazo de caña con una velocidad promedio de 0,3356 mm/h con una relación C/N de 57,46 y finalmente para bagazo de fique se obtuvo una velocidad promedio de 0,1427 mm/h para una relación C/N de 19,36 con ello se puede observar que para los medios realizados con bagazo de caña y coco con relaciones de C/N superiores a 50 hubo una velocidad mayor respecto al bagazo de fique; las relaciones se calcularon respecto a la cantidad de fibra adicionada.

En un estudio realizado sobre el crecimiento de *G. lucidum* se obtuvo que la relación C/N óptima debía estar entre 70 y 80 (Hsieh y Yang, 2004), además es necesario tener una alta relación C/N para que las enzimas ligninolíticas como peroxidasa de lignina (LiP), peroxidasa de manganeso (MnP) y lacasa producidas por los hongos de pudrición blanca puedan actuar eficientemente en la degradación de la lignina (Singh y Pandey, 2009).

La composición de los sustratos influyó en la velocidad de crecimiento, por un lado, están las fibras de coco que presentan una elevada estabilidad a los efectos biológicos ya que su degradación se ve obstaculizada por la existencia de celulosa y material lignificado (De Oliveira *et al.*, 2013), (Binti, Takagi, y Norio, 2016).

Es así que en los análisis realizados la fibra de coco presentó un porcentaje de lignina del 13,31 %, un porcentaje mayor respecto a los dos residuos lignocelulósicos restantes, 65,94 % de celulosa y 10,48 % de hemicelulosa. Sin embargo, la cinética de crecimiento de los micelios mostró que *G. lucidum* obtuvo velocidades de crecimiento mayores con fibra de coco y bagazo de caña, pero bajas en bagazo de fique. La elevada tasa de crecimiento que presentó el hongo en la fibra de coco puede atribuirse a la alta cantidad de lignina que este residuo contiene (Rajan, Abraham, y Abraham, 2008), ya que la capacidad de degradación del hongo depende de la composición del sustrato, es decir, de la materia orgánica como carbono y nitrógeno que tengan disponible para obtener energía (Bohacz, 2018).

La lignina forma una barrera que no permite acceder a las demás fuentes de carbono como celulosa o hemicelulosa que son fáciles de degradar (Bohacz, 2018). Los hongos de podredumbre blanca como *G. lucidum* se centran en oxidar la barrera formada por la lignina volviéndola de color blanco (Fukasawa, 2018), con la ayuda de algunas enzimas propias de estos hongos (Manavalan, y Heese, 2015), sin embargo, como la fibra de coco no es tan fácil de degradar los hongos avanzaron rápidamente pero no degradaron de manera eficaz toda la lignina.

Por otro lado, el fique contiene propiedades insecticidas y antimicóticas ya que las saponinas hacen parte de su composición (Imbachi y Morales, 2012). Las saponinas pueden clasificarse estructuralmente como esteroidales o terpenoides (Patra, 2012). Las saponinas presentes en el fique son de tipo esteroidal, estas saponinas son glúcidos los cuales son altamente tóxicos, con capacidad tensoactiva y hemolítica pueden causar muerte en peces y alergias cutáneas en humanos (Echeverri, Franco y Gonzáles, 2015).

Entre los mecanismos de acción por el cual las saponinas pudieron haber inhibido o retrasado el crecimiento fúngico está la lisis celular causada por la formación de porosidades acuosas en la membrana celular, generada por la unión de la saponina con los esteroides de la misma membrana aumentando su permeabilidad (Kind *et al.*, 2017). También la lisis celular pudo presentarse por lo mencionado por (Puentes y Nelly, 2009) (Ito *et al.*, 2007) en donde la activación de las vías de señalización, a través de la tirosina quinasa y la proteína G, la cual lleva a una acumulación intracelular de  $Ca^{++}$  y a la producción de oxígeno reactivo como el peróxido de hidrógeno.

En la cuantificación de residuos lignocelulósicos realizado al bagazo de fique se obtuvo un contenido de lignina del 5,93 %, de celulosa 38,67 % y de hemicelulosa 7,50 % siendo así más fácil de degradar que la fibra de coco o bagazo de caña, pero existe la posibilidad de que aun después del tratamiento previo de lavado que se le realizó al bagazo de fique hayan quedado restos de saponinas retrasando la velocidad de crecimiento en los hongos.

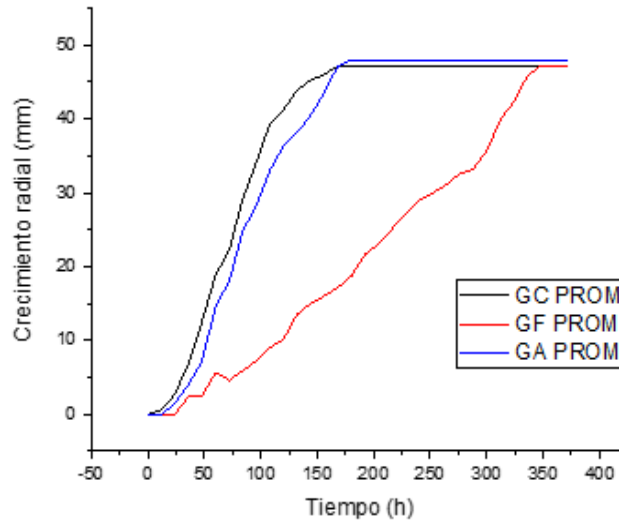
Figura 17. Colonización de *G. lucidum* en residuos lignocelulósicos



a) *G. lucidum* en medio de cultivo con bagazo de fique. b) *G. lucidum* en medio de cultivo con fibras de coco.

Se pudo observar que entre GF, GC y GA (Figura 17) la densidad del micelio fue mayor en GA debido a que la caña contiene menos lignina que la fibra de coco pero más que el bagazo de fique con un porcentaje de lignina del 6,5 %, celulosa 32,8 % y hemicelulosa 21,4 % por ende *G. lucidum* pudo crear mayor biomasa ya que logró oxidar lignina y se abrió paso para oxidar celulosa aunque con una velocidad menor, por ello se observó un micelio más denso de color blanco.

Figura 18. Crecimiento micelial promedio

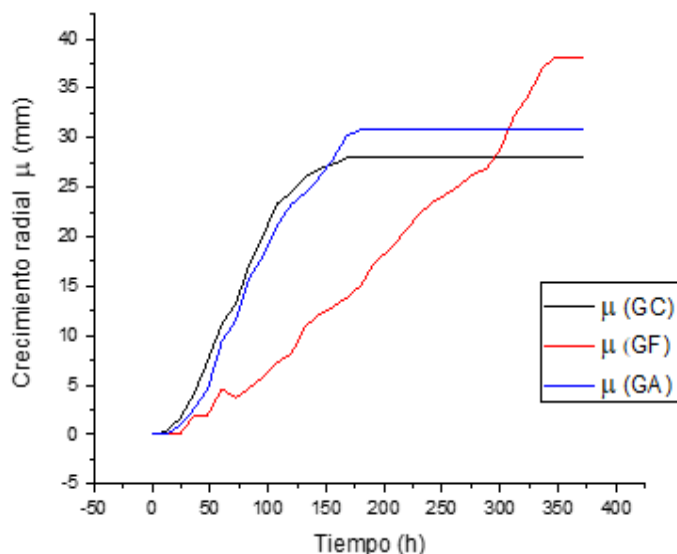


De la figura 18 se puede inferir que la muestra GC llegó a llenar la caja de Petri rápidamente debido a que la línea se muestra constante en menor tiempo respecto a las demás pasando por una fase de desaceleración para un tiempo total de 168 horas, para GA la línea se volvió constante a las 180 horas y finalmente para GF no hubo una fase de desaceleración gastando un total de 348 horas en colonizar toda la caja de Petri. Todas las muestras tuvieron un crecimiento radial de 46,8 mm.

La ecuación de Monod predice la cinética de crecimiento de los microorganismos, muestra la relación que hay entre la tasa de crecimiento y la concentración de un sustrato esencial que se encuentra como limitante (Liu, 2006).

La figura 19 modelada con la ecuación de Monod con un  $R^2$  igual o mayor a 0,95 mostró un crecimiento para GC de 27,97 mm a las 168 horas indicando que esto era lo máximo que podría crecer con el sustrato administrado pero la figura 18 de crecimiento real mostró que en las mismas 168 horas había crecido 46,8 mm mucho más de lo indicado por el modelo de Monod. Para GF el modelo predice que su crecimiento finaliza en 348 horas para un total de 38 mm, pero en la gráfica real a las 348 horas había llenado la caja de Petri con un valor de 46,8 mm. Para GA según el modelo de Monod su crecimiento terminaría en 180 horas con un crecimiento radial de tan solo 30,80 mm, pero realmente a las 180 horas ya había llenado la caja de Petri con un total de 46,8 mm.

Figura 19. Modelado del crecimiento con la ecuación de Monod



Estas diferencias entre el crecimiento real y el modelado podrían deberse a la influencia del tipo de sustrato utilizado, a la especie de hongo y sensibilidad del hongo a sustancias antimicrobianas y a los nutrientes que aporta el medio de cultivo. Por ende, el crecimiento micelial tuvo una rápida velocidad debido a que el medio estaba enriquecido con Mg, K, P, Ca, Mn, Cu, Fe, Zn y Na elementos que ayudan en el crecimiento de hongos (Owaid, Jaloot, y Ahmed, 2018). Así mismo, otros componentes empleados en la elaboración de los medios de cultivo como el Tween 80 pudieron haber mejorado la producción de enzimas de los hongos (Zhang y Cheung, 2011) (Barba *et al.*, 2019). Estudios también han demostrado que el tensoactivo Tween 80 incrementa la degradación de la materia orgánica principalmente la hemicelulosa y la celulosa (Zeng *et al.*, 2006). Esto a la vez pudo traducirse en una mayor velocidad de crecimiento micelial.

### 3.2. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS Y TÉRMICAS DEL MATERIAL ESPUMADO OBTENIDO

**3.2.1. Resultados elaboración material espumado.** Los resultados finales del material espumado obtenidos mediante la colonización fúngica presentaron diferentes características dependiendo del residuo lignocelulósico con el que fueron elaborados.

El material elaborado con bagazo de fique presentó un crecimiento similar para los dos tamaños de partícula con los que fue elaborado (Figura 20). Se observó un crecimiento superficial del hongo principalmente en los lugares donde fueron ubicados los granos de cebada colonizados. Al interior del material no se evidenció un crecimiento del micelio fúngico. Se atribuye este comportamiento a razones como el contenido de saponinas y sapogeninas residuales presente en este subproducto del cultivo de fique y que contienen propiedades insecticidas y antimicóticas (Imbachi y Morales, 2012) a pesar de los lavados que se realizaron en la adecuación del bagazo de fique.



**Figura 20.** Material obtenido con fibra de fique



Para el material elaborado a partir de fibra de coco se obtuvo resultados similares al bagazo de fique mostrando un crecimiento reducido en los dos tamaños de partícula (Figura 21), no hubo una colonización total del sustrato, solo se presentó un crecimiento en la parte superior de las fibras, posiblemente este comportamiento se debe a que las fibras de coco presentan una elevada estabilidad a los efectos biológicos ya que su degradación se ve obstaculizada por la existencia de celulosa y material leñoso (De Oliveira *et al.*, 2013) También se ha comprobado que la fibra de coco tiene un elevado contenido de lignina en comparación con otras fibras de origen vegetal (Rajan, Abraham, y Abraham, 2008). Los análisis que se le realizaron a la fibra de coco arrojaron un porcentaje de lignina del 13,31 %, de celulosa 65,94 % y hemicelulosa 10,48 %. Además, se ha comprobado que hongos como *G. lucidum* pueden considerarse como degradadores pobres de lignina en comparación con otros hongos de pudrición blanca (Pradeep y Subramanian, 2007).

**Figura 21.** Material obtenido con fibra de coco



Paralelamente a la elaboración de los materiales con fibra de fique o coco también se realizó ensayos con bagazo de caña de azúcar (Figura 22) debido a que presenta un alto contenido de celulosa, hemicelulosa y algo de lignina (Henrique *et al.*, 2018), contiene el 45,48 % de carbono y 0,15 % de nitrógeno (Pattanaik *et al.*, 2017).



El bagazo de caña de azúcar recibió el mismo tratamiento que los residuos lignocelulósicos anteriormente mencionados y posterior a su incubación se observó que las fibras del residuo habían sido colonizadas en gran parte por el micelio fúngico. En las fibras cercanas a la superficie del molde se presentó un crecimiento homogéneo del hongo que formó una película fina de micelio, mientras que en la parte interna del material no fue posible lograr un crecimiento micelial adecuado.

El bagazo de caña de azúcar demostró ser una materia prima apropiada para la elaboración de este tipo de materiales.

**Figura 22.** Material obtenido con bagazo de caña de azúcar



Por otro lado, el crecimiento de los hongos pudo verse afectado por algunos factores intrínsecos como minerales, humedad, pH, relación carbono nitrógeno, fuentes de nitrógeno y composición de sustratos. Factores extrínsecos como humedad relativa, temperatura, composición del aire, envasado y luminosidad, estos factores influyen directamente en el desarrollo y crecimiento de micelios (Barba *et al.*, 2019).

Los hongos como organismos quimio heterótrofos necesitan compuestos orgánicos para transformarlos en energía y tomar el carbono necesario para su desarrollo, (Tortora, Funke y Case, 2007). Los residuos lignocelulosicos por ser orgánicos contienen un alto porcentaje de carbono por ello fueron usados como fuente primaria de carbono (Singh y Pandey, 2009)

En cuanto a estos factores intrínsecos una inadecuada relación carbono nitrógeno (C/N) afectó el crecimiento micelial en los moldes. Las relaciones de carbono nitrógeno que se usaron fueron calculadas respecto a la cantidad de fibra adicionada y se obtuvieron las siguientes relaciones: para el sustrato con bagazo de fique la relación fue de 19,6; fibra de coco 51,36 y para bagazo de caña 57,46. Se ha confirmado que cuando la relación carbono nitrógeno es menor a 50 el hongo no puede colonizar por completo el sustrato ni dar una fructificación exitosa (Hsieh y Yang, 2004) (Rashad *et al.*, 2019).

Además es necesario tener una alta relación C/N para que las enzimas ligninolíticas como peroxidasa de lignina (LiP), peroxidasa de manganeso (MnP) y lacasa producidas por los

hongos de producción blanca puedan actuar eficientemente (Singh y Pandey, 2009), concordando con los resultados, las fibras de coco y fique cuya relación C/N es mucho menor a 50 no presentan crecimiento adecuado y el bagazo de caña que sobrepasa el 50 fue el ensayo que mejor resultado obtuvo con una conformación más uniforme.

Una de las características principales observadas en común en todos los tratamientos realizados fue la falta de crecimiento del micelio al interior de su estructura después de 3 semanas de crecimiento, como se mencionó anteriormente fue posible observar que en bagazo de caña el crecimiento fue alto respecto al bagazo de fique y a la fibra coco, pero no se colonizó la fibra en su totalidad, podría atribuirse este comportamiento a la falta de aireación del material. Debido principalmente a que la compresión de las fibras y su tamaño reducido impide un adecuado intercambio de gases.

También se conoce que según el tipo de requerimiento de oxígeno los hongos se clasifican en cuatro categorías: aerobios obligados, aerobios facultativos, fermentadores obligados y anaerobios obligados (De García y Caridad, 2012). La aireación permite el metabolismo del hongo *G. lucidum*, ayuda en la eliminación de metabolitos y en la regulación de humedad (Barba *et al.*, 2019). Gurung, Budathoki y Parajuli declararon que *G. lucidum* requiere de una buena aireación para su desarrollo y que sin ello habrá poco crecimiento micelial de las cepas de *G. lucidum* en el sustrato (Gurung, Budathoki y Parajuli, 2013).

**3.2.2. Caracterización del material espumado por sus propiedades mecánicas y térmicas.** Debido a que el crecimiento del micelio en las fibras de coco y bagazo de fique no fue el adecuado y no logró colonizar la totalidad del sustrato solo fue posible realizar la determinación de las propiedades mecánicas en los materiales elaborados a partir del bagazo de caña de azúcar.

**3.2.2.1. Determinación de propiedades mecánicas.** La medición de las propiedades mecánicas se llevó a cabo después del secado que se les realizó a las muestras que habían sido almacenadas durante 9 días hasta que se observó la colonización superficial total de las fibras.

**Compresión:** (Figura 23) muestra los especímenes de prueba. El tratamiento uno con bagazo de caña de 0,3 mm de longitud (T50) presentó un promedio para esfuerzo a la compresión de 38,688 KPa y un módulo de elasticidad promedio de 143,290 KPa, el segundo tratamiento con bagazo de caña de 1,1 mm de longitud (T16) presentó un promedio para esfuerzo de compresión de 53,870 KPa y un módulo de elasticidad de 189,353 KPa el blanco o patrón de referencia poliestireno expandido (EPS) presentó un esfuerzo de compresión promedio de 58,327 KPa y un módulo de elasticidad de 271,934 KPa (cuadros 13) y (Figura 26-28).

Los dos tratamientos arrojaron diferentes resultados entre sí, tanto en esfuerzo de compresión como en el módulo de compresión debido al crecimiento no uniforme del hongo

que por ser de origen biológico creció de diferente manera en los dos tratamientos y en las 10 réplicas que se hicieron, por observación el crecimiento del hongo se vio favorecido en el tratamiento 2 con caña T16 ya que hubo mayor compactación porque la longitud de la fibra permitió mayor adhesión entre la fibra y el micelio (Figuras 24-25) Por ello el tratamiento 1 con caña de T50 mostró un menor esfuerzo de compresión (38,688 KPa) y una desviación estándar de 11,565 el tratamiento 2 con caña T16 arrojó un esfuerzo máximo de (53,870 KPa) con una desviación estándar de 6,994 eso significa que los datos no están tan dispersos entre sí.

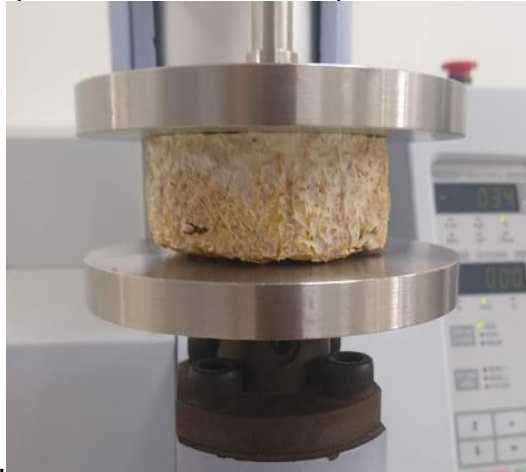
**Figura 23.** Especímenes de material obtenido con bagazo de caña de azúcar para pruebas de compresión



Por lo tanto el tratamiento 1 mostró menor módulo de compresión (143,290 KPa) respecto al tratamiento 2 (189,353 KPa) lo que indica que a mayor módulo mayor resistencia y más rígido es el material, cabe resaltar que el módulo no se ve afectado por la cantidad de adhesión entre el refuerzo y la matriz sino por la relación de aspecto de la fibra que actúa como refuerzo (DeArmitt, 2017), sin embargo los resultados de relación de aspecto de las fibras tamizadas no están muy alejados entre sí y tienen coherencia con los módulos obtenidos, para la fibra de T50 la relación de aspecto promedio fue de 6,669 y para la fibra T16 la relación de aspecto promedio fue de 8,534.

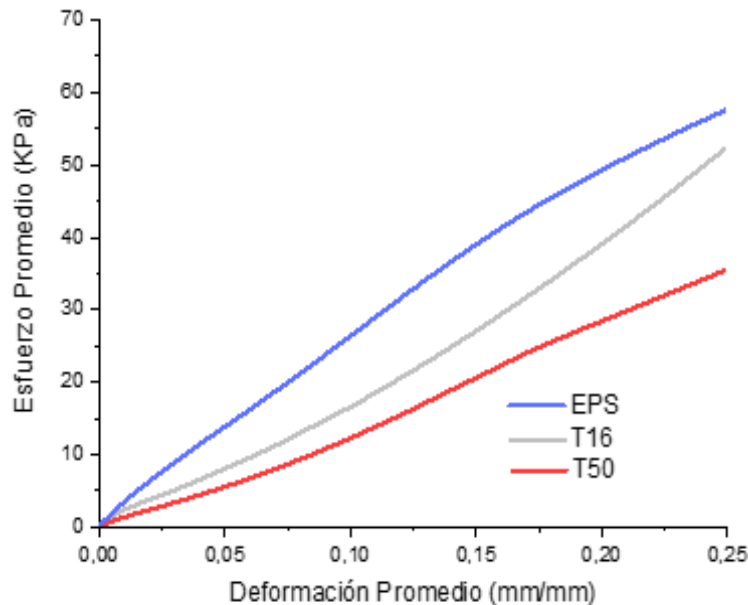
Ahora si se comparan los tratamientos con el EPS, este obtuvo una fuerza de compresión de 58,327 KPa y un módulo de 271,935 KPa, siendo el EPS superior a los tratamientos, ya que, el EPS es un material celular de espuma polimérica que absorbe energía y por ello se usa como material de embalaje o de protección (Ling, Cardí, y Gilchrist, 2018), aun así los resultados obtenidos con el bagazo de caña T16 no están tan alejados del material de referencia (Figuras 24-25) y se puede seguir mejorando para que aumente su resistencia y pueda reemplazar parcialmente el polímero y para ello es necesario tener una alta densidad ya que a medida que aumenta la densidad aumenta el módulo elástico (Cronin y Ouellet, 2016), (Beju y Mandal, 2017).

Figura 24. Prueba de compresión del material compuesto



Resultados similares se han obtenido en otros estudios realizados por López Nava *et al.*, (2016) en donde usan un micelio (*Pleurotus sp.*) residuos de cultivos (*Triticum sp.*), y recubrimientos comestibles (carragenano, quitosano y goma xantana). en sus resultados de esfuerzo de compresión obtuvieron 41,72 KPa para su muestra, aunque ellos utilizaron la norma ASTM C 165 para realizar la prueba de resistencia a la compresión, de igual manera Holt *et al.*, 2012 utilizó la ASTM C165 y obtuvo resultados muy variables desde 1,1 - 72 KPa para fuerza compresiva ya que hizo pruebas con inóculo líquido y sólido en algodón. con *G. lucidum*, Bruscato *et al.*, (2019) trabajaron con macrofungi *P. sanguineus* y *L. velutinus* sobre aserrín y salvado de trigo y sus resultados para el módulo de compresión son 1300 KPa aunque no reportan la norma que utilizaron para hacer las mediciones.

Figura 25. Esfuerzo promedio vs deformación de caña T16, caña T50 y EPS (compresión)



Cuadro 13. Esfuerzo y módulo de Young del ensayo de compresión.

Bagazo de caña tamiz 50		Bagazo de caña tamiz 16		Poliestireno expandido	
Esfuerzo de compresión (KPa)	Módulo Young (KPa)	Esfuerzo de compresión (KPa)	Módulo Young (KPa)	Esfuerzo de compresión (KPa)	Módulo Young (KPa)
54,775	151,859	56,442	183,863	55,899	245,422
38,690	159,681	48,443	173,860	57,072	284,519
40,899	125,521	45,269	192,808	60,461	312,650
28,048	133,854	61,590	228,718	60,400	286,903
61,255	242,863	55,411	208,810	59,644	276,507
31,310	100,092	63,898	174,884	61,245	286,901
26,310	116,080	45,625	158,169	63,388	334,718
46,897	177,772	51,162	163,840	51,711	199,747
28,383	114,130	63,684	182,360	59,814	222,249
30,313	111,051	47,171	226,219	53,640	269,728
Media 38,688	Media 143,290	Media 53,870	Media 189,353	Media 58,327	Media 271,934
Desv. 11,565	Desv. 40,431	Desv. 6,994	Desv. 23,347	Desv. 3,466	Desv. 38,229

Cuadro 14. Análisis estadístico

<b>Comparaciones múltiples</b>							
Variable dependiente: Esfuerzo de compresión							
Tratamiento			Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
Games-Howell	T16	T50	15,18150*	4,50508	0,011	3,4634	26,8996
		EPS	-4,45790	2,60175	0,237	-	2,4009
	T50	T16	- 15,18150*	4,50508	0,011	-	-3,4634
		EPS	- 19,63940*	4,02446	0,001	-	-8,7095
	EPS	T16	4,45790	2,60175	0,237	-2,4009	11,3167
		T50	19,63940*	4,02446	0,001	8,7095	30,5693

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

El análisis estadístico en la prueba de comparaciones múltiples (Cuadro 14) comprueba estadísticamente lo analizado anteriormente en donde se presentan dos comportamientos diferentes entre los tres tratamientos realizados. Se exhiben conductas similares en los resultados de esfuerzo de compresión entre los tratamientos T16 y EPS con una significancia entre estos por encima de 0,05 lo que indica que no hubo diferencias significativas. Sin embargo, T50 presenta un valor de significancia por debajo de 0,05 al compararlo con los tratamientos realizados comprobando que existen unas diferencias a tener en cuenta sobre esfuerzo de compresión.

Figura 26. Deformación vs esfuerzo Tamiz 16 (Compresión)

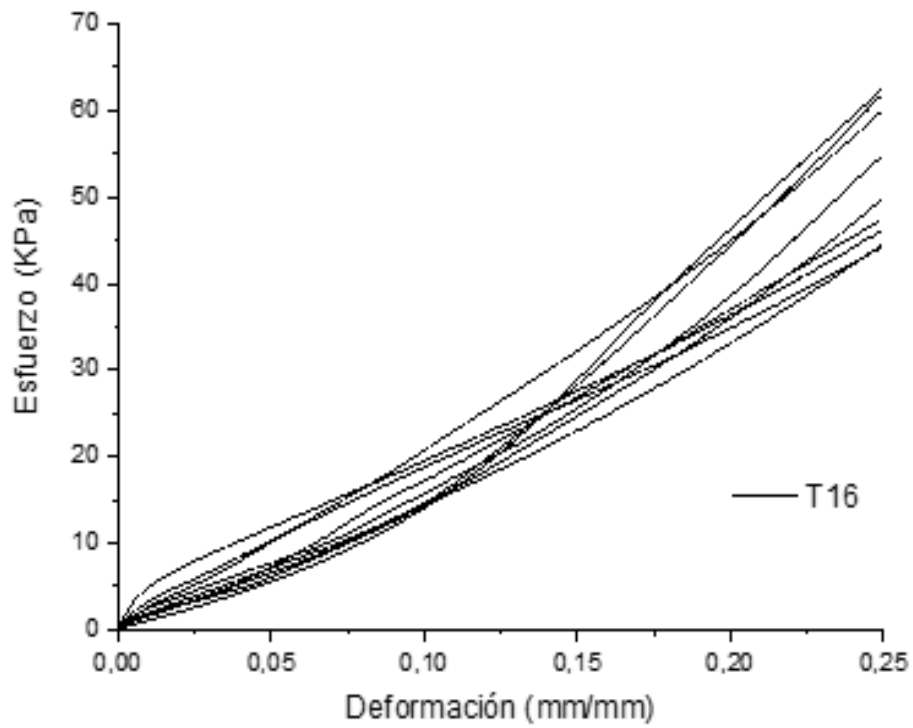


Figura 27. Deformación vs Esfuerzo Tamiz 50 (Compresión)

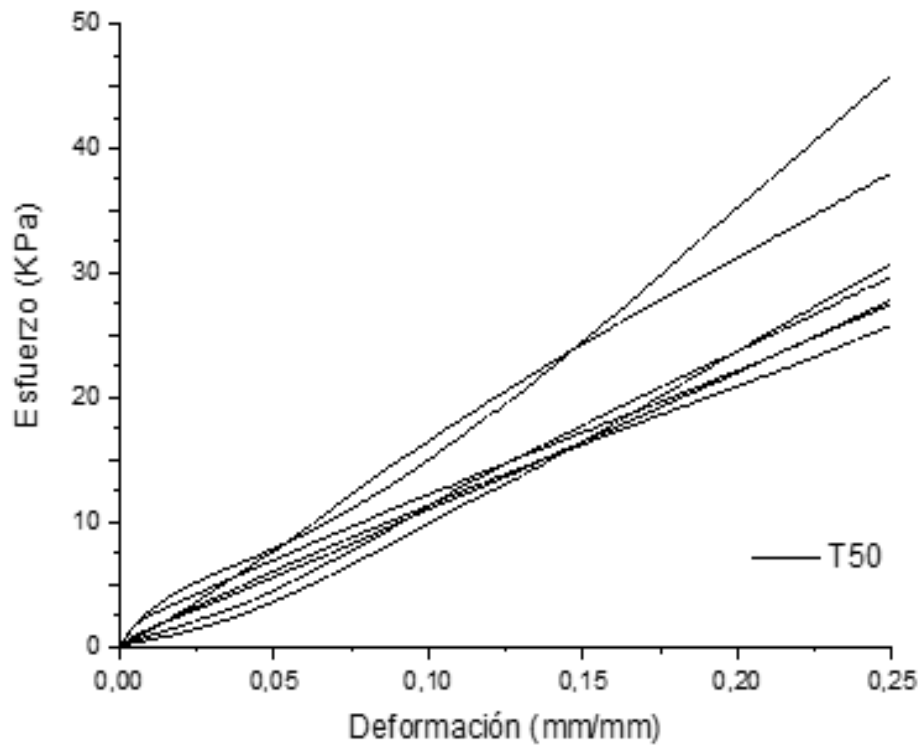
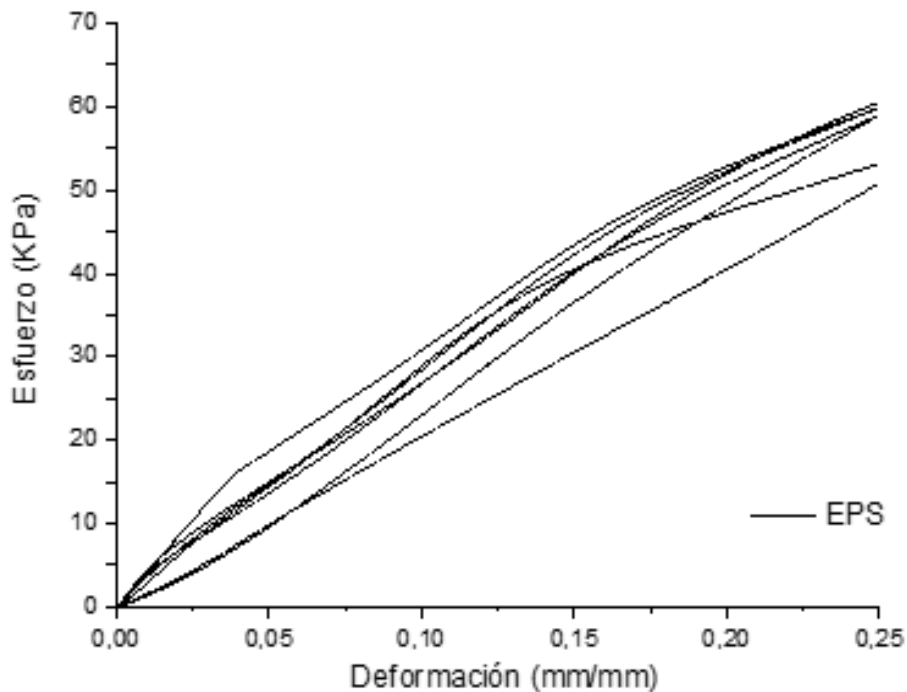


Figura 28. Deformación vs Esfuerzo blanco (Compresión)



**Flexión:** el cuadro 16 muestra los resultados del esfuerzo a la flexión y módulos de elasticidad obtenidos en las pruebas de resistencia a la flexión sin embargo las 10 réplicas no se presentan debido a que se eliminaron tres datos que estaban muy dispersos (Figura 29).

Para el tratamiento 1 con bagazo de caña T50 se obtuvo un esfuerzo o resistencia a la flexión promedio de 17,369 KPa con una desviación estándar de 4,356 un módulo de elasticidad o módulo de Young promedio de 189,355 KPa. El tratamiento 2 con bagazo de caña T16 obtuvo un esfuerzo de flexión promedio de 26,255 KPa con una desviación estándar de 8,503 un módulo de elasticidad o módulo de Young promedio de 320,942 KPa.

La resistencia a la flexión identifica la cantidad de tensión y fuerza que un material puede soportar de modo que resista cualquier falla de flexión (George y Elvis, 2019). En las figuras 30 y 31 se observan las caídas de las curvas en donde se rompe el material espumado a un esfuerzo máximo que varía para cada réplica y tratamiento, en donde se da la rotura de la fibra y el agrietamiento de la matriz ya que la fibra por sí sola no es responsable del bajo comportamiento de flexión, la matriz también contribuye a ello. La baja resistencia a la flexión se debe al micro bloqueo de las fibras en el material compuesto (Chandramohan, 2019) como también al bajo crecimiento interno y heterogéneo del micelio, haciendo que el material espumado no sea uniforme y sea quebradizo, demasiado frágil para evitar la ruptura sobre todo en el tratamiento con caña T50. En estudios realizados se menciona que el grosor de la piel del hongo es importante en las propiedades mecánicas ya que brindan una mayor compactación y elasticidad al espumado (Appels *et al.*, 2019).

Figura 29. Prueba de compresión de flexión del material compuesto



En la figura 32 se observa como el EPS no se fracturó y su resistencia a la flexión fue de 74,251 KPa con un módulo de 851,738 KPa lo que indica que el material es más rígido y elástico que los dos biocompuestos fabricados. En el estudio realizado por (López Nava *et al.*, 2016) se obtuvo en sus resultados de resistencia a la flexión 10,91 KPa, utilizaron la misma norma ASTM C 203 para realizar la prueba de resistencia a la flexión, de igual manera (Holt *et al.*, 2012) utilizó la ASTM C 203 y obtuvo resultados muy variables desde 7 - 26 KPa para esfuerzo de flexión ya que hizo pruebas con inóculo líquido y sólido en algodón con *Ganoderma L.*, (Appels *et al.*, 2019) informó de un biomaterial con un rango de esfuerzo a la flexión entre 50 - 870 KPa y un módulo de Young entre 1000 - 80000 KPa.

Cuadro 15. Análisis estadístico

Comparaciones múltiples							
Variable dependiente: Esfuerzo de flexión							
Tratamiento		Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%		
					Límite inferior	Límite superior	
Games-Howell	T16	T50	8,88600	3,90035	0,111	-2,0160	19,7880
		EPS	-49,22457	3,93439	0,000	-60,1745	-38,2746
	T50	T16	-8,88600	3,90035	0,111	-19,7880	2,0160
		EPS	-58,11057	2,56711	0,000	-64,9608	-51,2604
	EPS	T16	49,22457	3,93439	0,000	38,2746	60,1745
		T50	58,11057*	2,56711	0,000	51,2604	64,9608

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.



La prueba de comparaciones múltiples de Games - Howell para esfuerzo de flexión (Cuadro 15) demuestra que se presentaron dos tendencias, estadísticamente se comprobó que no existen diferencias significativas en cuanto a esfuerzo de flexión entre los tratamientos T16 y T50 con una significancia entre estos por encima de 0,05. Mientras que el tiramiento con EPS es diferente a los dos anteriormente mencionados ya que la significancia se encuentra por debajo de 0,05. Esto indica que T16 y T50 no logran igualar al EPS en cuanto a esfuerzo de flexión.

Cuadro 16. Esfuerzo y módulo de Young del ensayo de flexión

Bagazo de caña tamiz 50		Bagazo de caña tamiz 16		Poliestireno expandido	
Esfuerzo de flexión (KPa)	Módulo Young (KPa)	Esfuerzo de flexión (KPa)	Módulo Young (KPa)	Esfuerzo de flexión (KPa)	Módulo Young (KPa)
16,367	175,237	22,0720	282,213	68,486	764,939
12,807	140,470	17,3461	264,539	77,394	848,830
15,895	187,870	38,3145	437,669	77,661	926,846
17,382	212,366	19,8737	244,883	73,220	848,508
23,167	239,297	29,2187	311,322	77,893	915,844
11,882	105,781	18,3696	229,059	70,853	805,458
24,083	264,464	38,5904	476,910	82,850	789,064
Media 17,369	Media 189,355	Media 26,255	Media 320,942	Media 74,251	Media 851,738
Desv. 4,356	Desv. 51,047	Desv. 8,503	Desv. 90,200	Desv. 4,536	Desv. 57,087

Figura 30. Alargamiento vs Esfuerzo Tamiz 16 (Flexión)

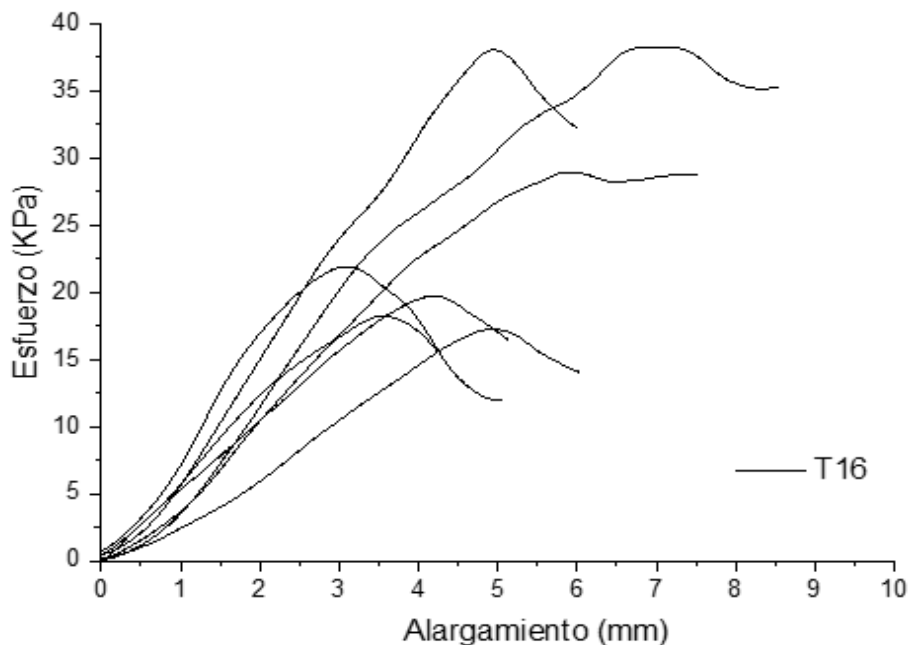


Figura 31. Alargamiento vs Esfuerzo Tamiz 50 (Flexión)

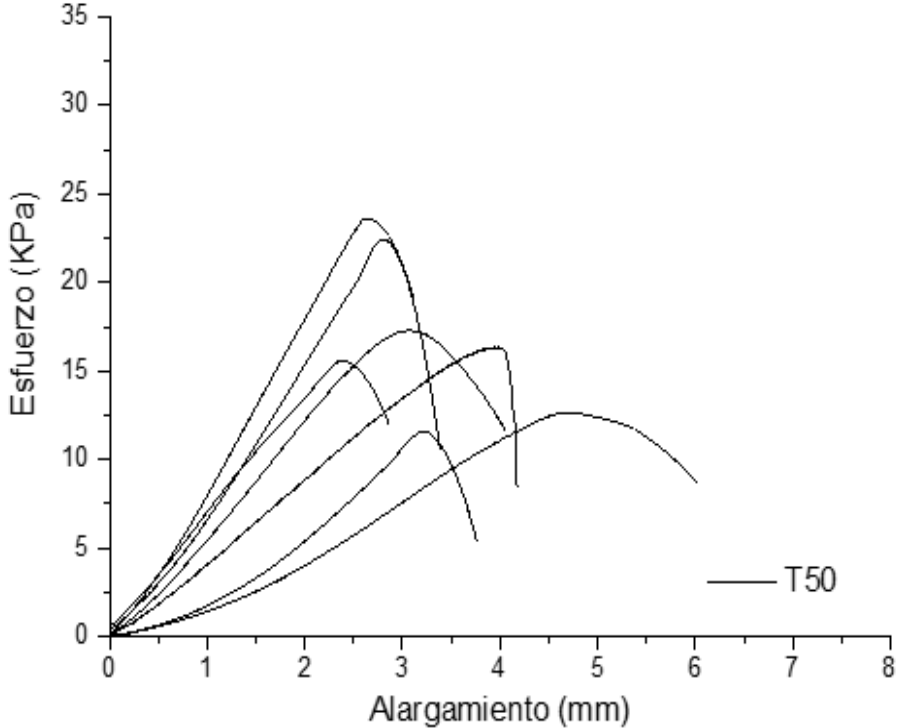
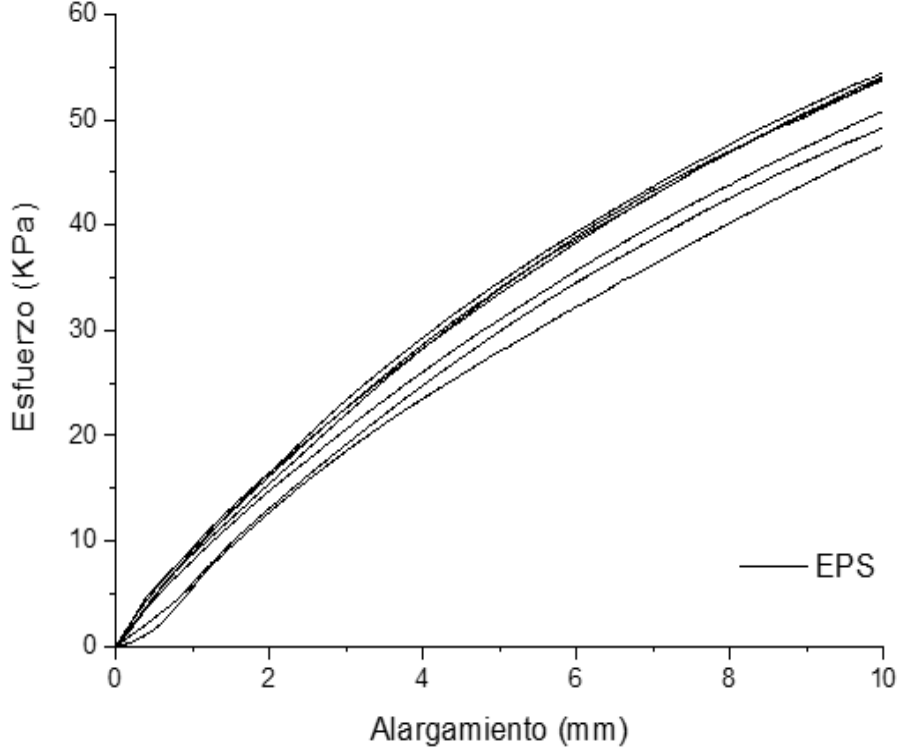


Figura 32. Alargamiento vs Esfuerzo Blanco (Flexión)



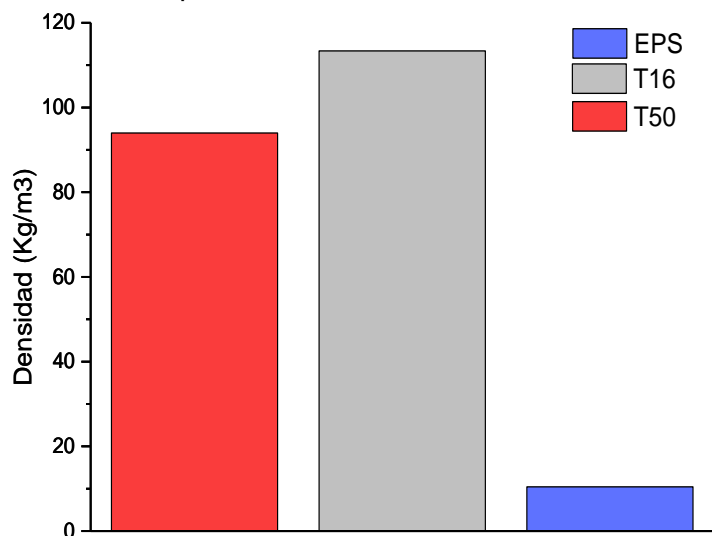
**Densidad aparente:** la densidad del material fue determinada realizando 10 mediciones a probetas según lo estipulado en la norma ASTM D3748 y se calculó el valor promedio tanto de las masas como de la densidad. Los resultados (Cuadro 14) observados demuestran que las densidades del material biocompuestos superen en gran medida a las del EPS presentándose diferencias significativas entre ellos. Mientras que en los ensayos con diferente tamaño de residuo lignocelulósico los de T50 logran obtener una densidad inferior en comparación con los de T16. De igual forma se presentó una menor variación entre las densidades del material con menor tamaño de partícula.

Cuadro 17. Resultados de prueba de densidad aparente

Ensayo	Masa (g)	Volumen (Cm <sup>3</sup> )	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Desviación
T50	8,457	90	93,966	±0,0041
T16	10,203	90	113,372	±0,01
EPS	0,939	90	10,44	±0,01

Las diferencias entre las densidades de los materiales elaborados con fibra de bagazo de caña de azúcar con los dos tamaños de partícula podrían explicarse debido al crecimiento del hongo dentro del material ya que mantener una densidad constante en todo el material es complejo; debido a que la materia prima utilizada es un organismo vivo (Abhijith, Ashok, y Rejeesh, 2018). Al utilizar fibras más cortas estas logran agruparse mejor reduciendo los espacios entre fibras impidiendo el paso de aire y con esto retrasando el crecimiento micelial ya que como se mencionó anteriormente el buen flujo de aire permite que el hongo desarrolle sus actividades metabólicas, además de permitir una regulación de humedad (Barba *et al.*, 2019). Al haber un menor crecimiento de biomasa fúngica la densidad disminuye. Por el contrario, el material elaborado con fibras de bagazo de caña de mayor tamaño permite que se generen espacios interfibrilares propiciando un mejor crecimiento del micelio fúngico.

Figura 33. Diagrama de barras para densidad



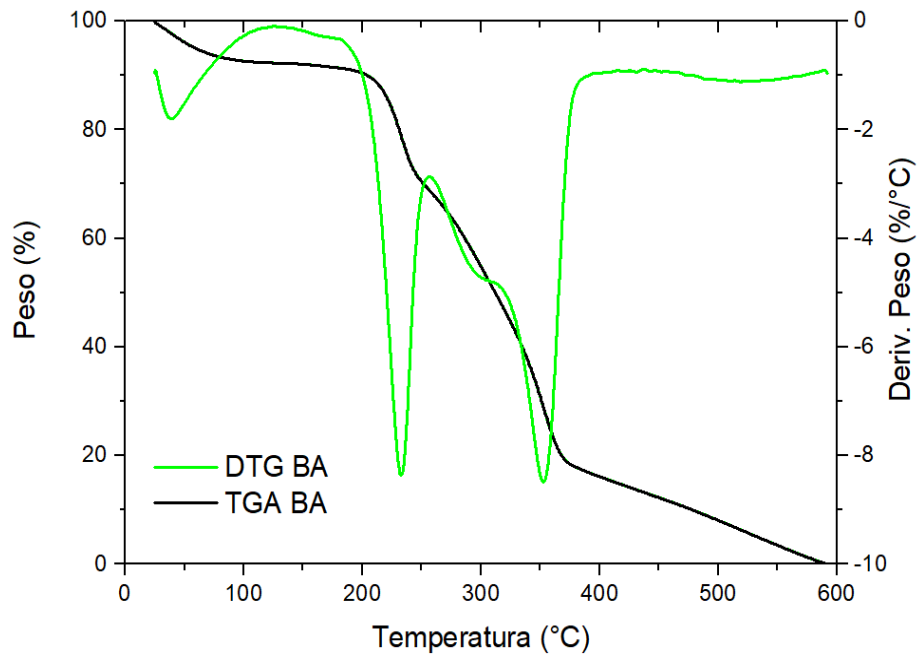
Se observa comportamientos similares de densidad al comparar los resultados obtenidos con los de otros estudios similares como los de (Bruscato *et al.*, 2019) en donde obtuvieron datos entre 300 a 350 kg/m<sup>3</sup>; (López *et al.*, 2016) quienes reportan densidades entre 57 a 209 Kg/m<sup>3</sup>; (Holt *et al.*, 2012) con densidades alrededor de 66 a 224 Kg/m<sup>3</sup> y (Appels *et al.*, 2019) quien obtuvo valores de densidad entre 100 a 390 kg/m<sup>3</sup>; también los resultados obtenidos con *G. lucidum* son similares a los de (Yang *et al.*, 2017). Es evidente la diferencia de densidades entre el EPS y el material obtenido, superando este último en aproximadamente 90 unidades de kg/m<sup>3</sup> al biomaterial de menor densidad obtenido (Figura 33). El biocompuesto de matriz fúngica obtenido presenta la ligereza suficiente como para ser aplicado como objeto posible de embalaje para electrodomésticos, pero la densidad podría verse afectada debido a las variaciones que puedan presentar en su composición los sustratos lignocelulósicos (Bruscato *et al.*, 2019).

**3.2.2.2. Determinación de propiedades térmicas (Análisis termogravimétrico y Calorimetría de barrido diferencial).** La figura 34 sobre análisis termo gravimétrico y su derivada (TGA y DTG) obtenido para la fibra de bagazo de caña (BA) presenta cinco etapas de descomposición, la primera se dio a una temperatura promedio de 39,96 °C en donde se pierde el agua y otras sustancias volátiles con un porcentaje de pérdida de peso del 8,05 %, entre 100 a 150 °C en la curva de TGA se presenta peso lo que indica que hasta ese punto se puede usar la fibra antes de que empiece la pérdida o degradación de la biomasa, la segunda etapa mostró la descomposición de la hemicelulosa con un porcentaje de pérdida de peso del 23,17 % a una temperatura de aproximadamente 232,58 °C, en la tercera etapa se presentó la descomposición de la celulosa a 289,60 °C y 20,6 % de pérdida de peso para la cuarta etapa se descompuso la lignina a 353,75 °C con una pérdida de peso de 32 %, después de los 400 °C quedan los residuos inorgánicos que forman las cenizas 16,2 % los resultados obtenidos son similares a los reportados por un estudio de caracterización de bagazo de caña (Guimarães *et al.*, 2009), además en un estudio en donde se analiza el comportamiento individual termo gravimétrico de los componentes de la biomasa se encontró que la hemicelulosa se degrada entre 220 - 315 °C; 315 - 400 °C se descompone la celulosa; y a temperaturas > 400 °C finalmente se da la descomposición de la lignina (Yang *et al.*, 2006).

La fibra de bagazo de caña como material lignocelulósico se compone principalmente de polímeros de carbohidratos como celulosa, hemicelulosa y lignina los cuales están unidos íntimamente por enlaces covalentes formando una estructura compacta y rígida en donde la hemicelulosa cubre las fibras de celulosa para protegerlas y evitar su degradación, así mismo la lignina se encuentra entrelazada con la celulosa y hemicelulosa formando un escudo más fuerte contra la degradación (Wang *et al.*, 2019).

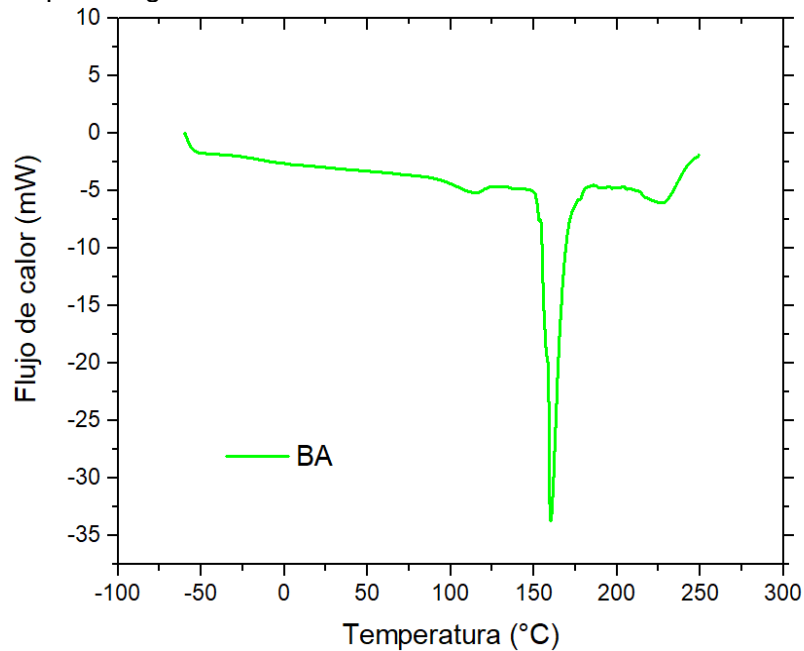
Las cadenas de celulosa y hemicelulosa se encuentran unidas por fuerzas de Vander waals y enlaces de hidrógeno, enlaces más fáciles de romper (Cichosz y Masek, 2019), en comparación con la estructura química de la lignina ya que esta está compuesta por tres monolignols conocidos como p-hidroxifenilo (H), guaiacilo (G) y siringilo (S) que son unidades fenólicas unidas por diferentes enlaces C-O y C-C. Romper estos enlaces realmente es un desafío por ello es que se degradan a una temperatura tan alta aunque dependiendo de la especie de planta su estructura puede variar (Naron *et al.*, 2019).

Figura 34. TGA y DTG del bagazo de caña



Debido a estas características de estructura de los compuestos lignocelulósicos se espera que la degradación térmica de la celulosa y la hemicelulosa sea rápida mientras que la lignina se puede termo degradar de forma lenta y compleja. (Borsoi, Scienza, y Zattera, 2013)

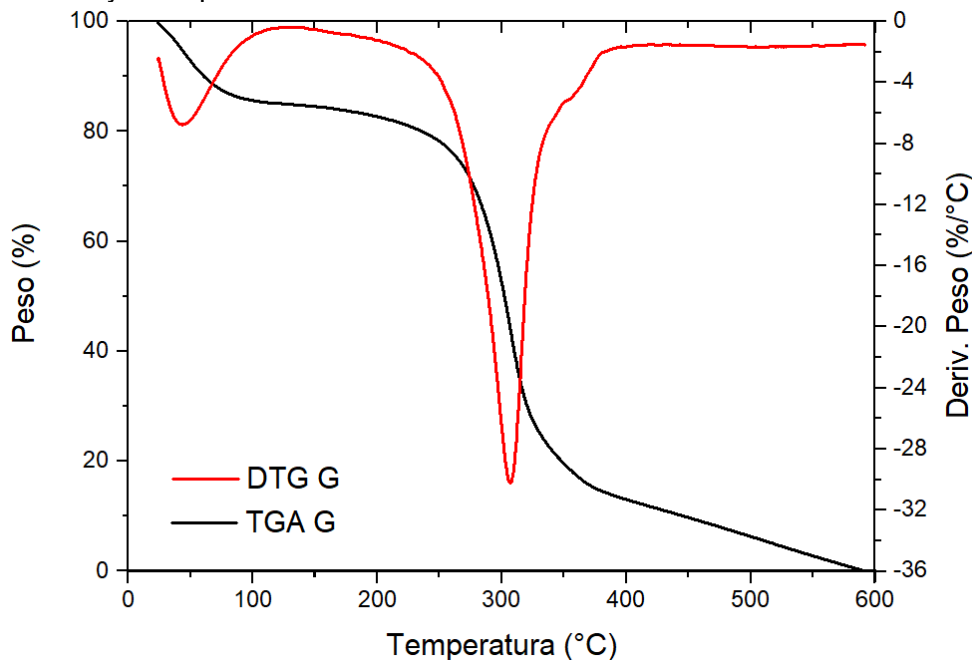
Figura 35. DSC para bagazo de caña de azúcar



La figura 35 muestra la curva de calorimetría diferencial de barrido DSC para la fibra de bagazo de caña se observa una temperatura de transición vítrea  $T_g$  de 116,16 °C en donde cambia a un estado blando o gomoso; una temperatura de fusión  $t_m$  promedio que se da a los 160,16 °C mostrando un pico endotérmico sin tener un pico de cristalización y por último la temperatura donde inicia el proceso de degradación  $t_d$  de 228,45 °C. La  $T_g$  es importante para tener en cuenta el uso final que se le dará a un material en particular, por debajo de la  $T_g$  los materiales tienen poca movilidad de sus moléculas y por encima su comportamiento es como un material gomoso (McKeen, 2017). A 116,16 °C se da evaporación de agua y a 160,16 °C se da la fusión de la lignina, celulosa y hemicelulosa para su posterior degradación (De Souza *et al.*, 2016).

La figura 36 del análisis termo gravimétrico realizado para el micelio fúngico de *G. lucidum* (G) presenta 3 fases de degradación, la primera encontrándose entre los 20 y 100°C atribuidas a la pérdida de humedad de aproximadamente un 15,4 % del total másico de la muestra. Posteriormente entre los 200 y 400 °C se pudo presentar una degradación de las estructuras del micelio fúngico, ya que la pared celular del micelio fúngico está formada por tres capas una capa externa de glucanos y polisacáridos unidos a glicoproteínas; una capa media de glucanos; una capa interna de glucanos y quitina unida covalentemente (Trygg, Beltrame, y Yang, 2019), (Alzorqi *et al.*, 2017).

Figura 36. TGA y DTG para *G. lucidum*

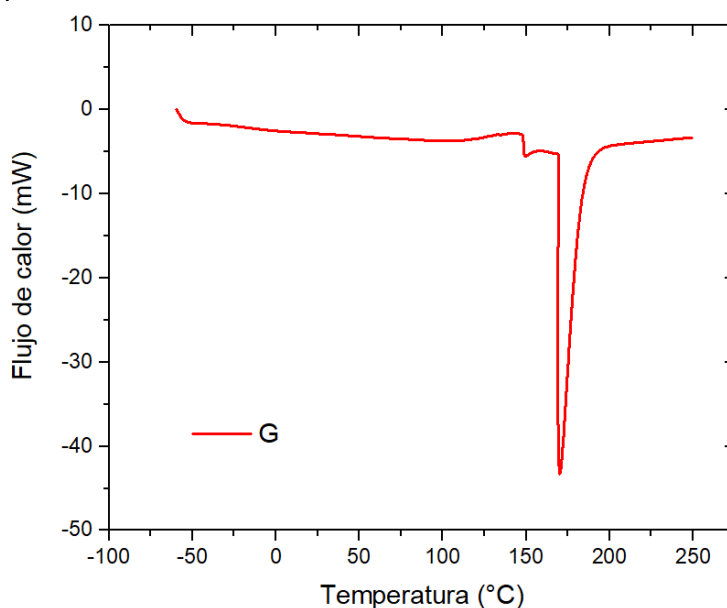


Generalmente en las hifas la quitina está presente entre un 10 y 20 %, glicoproteínas 30 a 50 % y B-glucano en un 50 a 60 % (Pontón, 2008) en esta etapa se presentó una degradación cercana al 72% del peso inicial. Según reportes la molécula de B-glucano se degrada entre 200 - 400 °C lo cual es consistente con las gráficas obtenidas (Kagimura *et*

*al.*, 2015). La tercera parte puede atribuirse a la degradación del carbono residual entre los 400 y 600 °C. Los resultados obtenidos en los termogramas presentan una similitud con los resultados obtenidos por (Ospina *et al.*, 2014) y (Hassainia, Satha, y Bou, 2018) en cuanto a la degradación de quitina fúngica.

La figura 37 de DSC para el hongo muestra una  $T_g$  de 149,19 °C en donde se evapora todo el agua y el hongo se ablanda, una  $T_m$  de 170,15 °C en donde el micelio se torna líquido y una  $T_d$  mayor a 250 °C con una entalpía de 213,3 J/g la muestra no presentó un pico de cristalización.

Figura 37. DSC para *G. lucidum*



La curva de TGA y DTG para el EPS Figura 38 muestra una sola etapa de degradación en donde la descomposición del material se da a una temperatura promedio de 411,14 °C, por lo general el polímero tiene una alta estabilidad por su baja volatilidad. Generalmente este polímero espumado inicia su descomposición después de los 470 °C ya que se producen pequeños polímeros de alta volatilidad por su bajo peso molecular y de esa manera comienza a descomponerse. El compuesto que se empieza a descomponer primeramente es el estireno por debajo de 500 °C y superior a esta temperatura se forman compuestos como tolueno, benceno y otros oligómeros de estireno (Kannan *et al.*, 2009).

El análisis DSC para el EPS (Figura 39) reveló un comportamiento totalmente diferente en comparación con los otros tratamientos. Se observa la presencia de un pico aproximadamente a los 110 °C el cual posiblemente corresponde a la  $T_g$  del material y cuenta con una entalpía de 0,697 J/g (Richards y Lekakh, 2019). En este punto el material puede presentar una estructura similar al caucho (Richards y Lekakh, 2019). Este comportamiento se puede presentar probablemente por la pérdida de gases, agentes

expansores o aditivos presentes al interior del material y usados en su fabricación (Saltos *et al.*, 2015). No se observa picos que puedan corresponder a  $T_m$  o  $T_d$  ya que la degradación de este inicia aproximadamente a los 350 °C y se descompone a una temperatura promedio cercana a los 410 °C como se mencionó en el análisis de TGA (Samper *et al.*, 2008). Los resultados de los análisis son similares a los reportados por (Richards y Lekakh, 2019) y (Saltos *et al.*, 2015).

Figura 38. TGA y DTG para el EPS

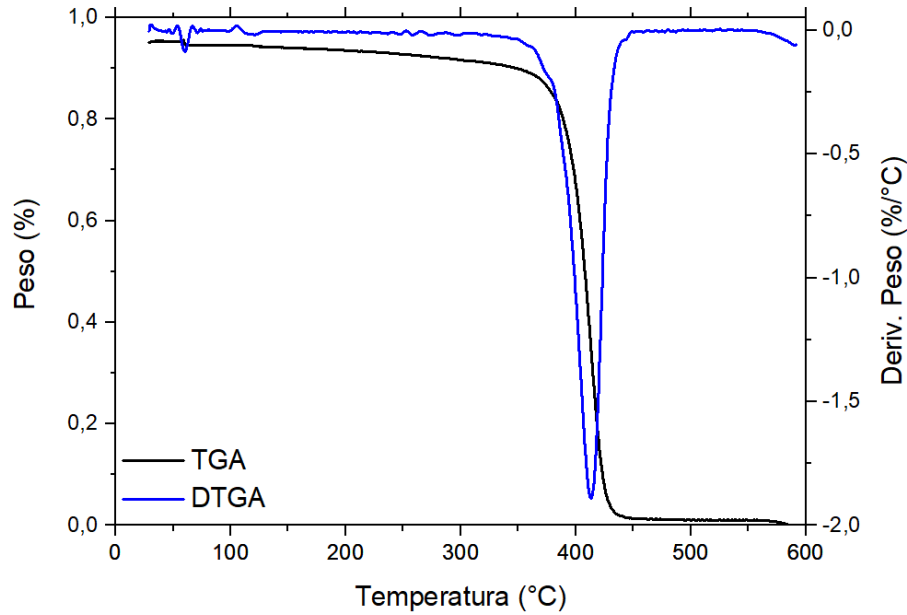
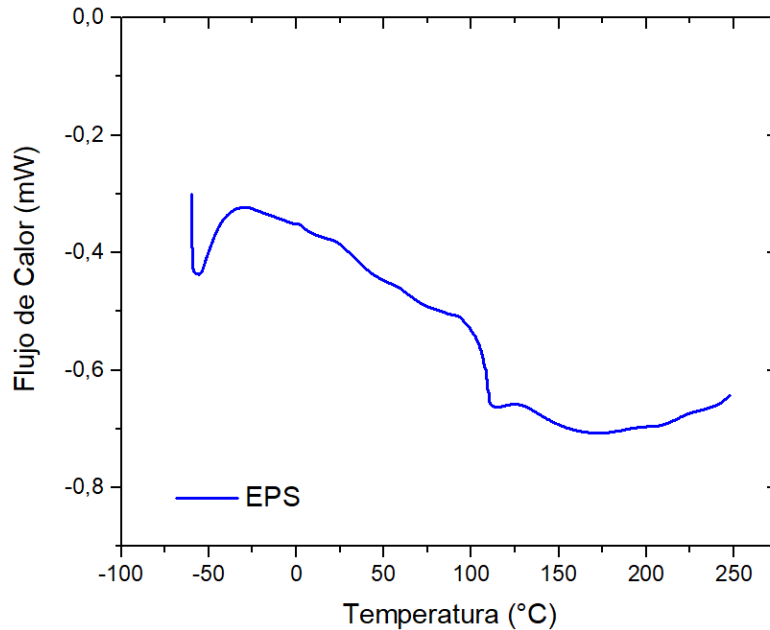


Figura 39. DSC para EPS



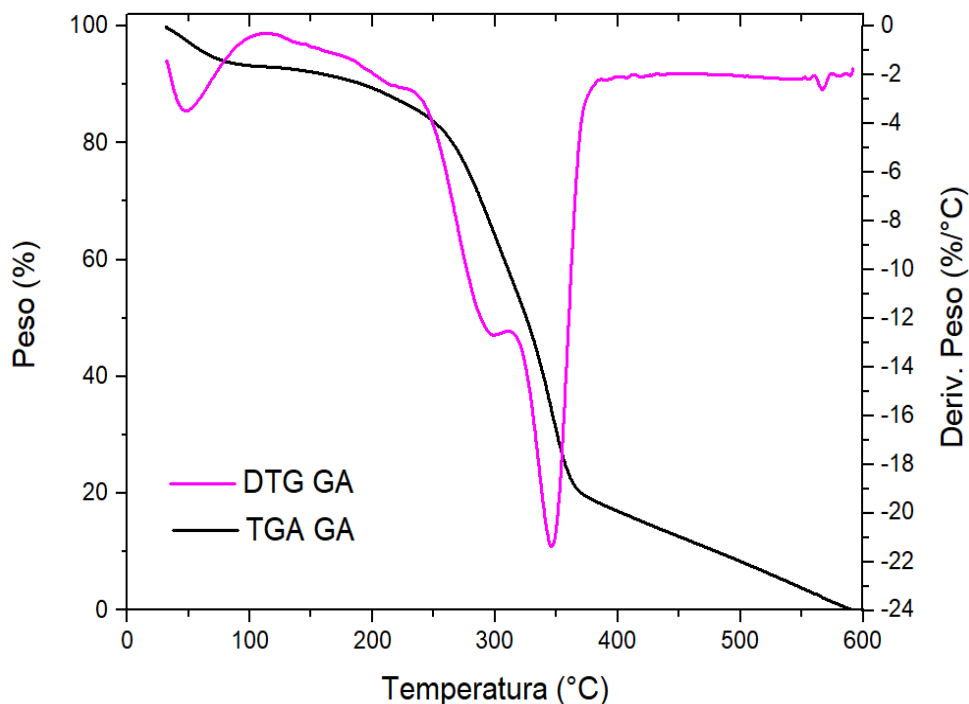


En cuanto a los resultados obtenidos del análisis termo gravimétrico (Figura 40) para el material compuesto por las fibras de bagazo de caña y el micelio (GA), la gráfica mostró una degradación en tres etapas, la primera etapa ocurrió a una temperatura promedio de 49,37 °C con una pérdida de masa del 7 % en la cual se pierde la totalidad del agua retenida por las fibras y el hongo, en la segunda etapa ocurre una pérdida de masa del 46 % a una temperatura promedio de 294,47 °C y finalmente en la tercera etapa se da una pérdida de masa del 26 % a 347,29 °C y a partir de esa temperatura quedan las cenizas, los resultados obtenidos son muy similares a los reportados en un estudio hecho con aserrín, salvado de trigo y micelio de *Pleurotus albidus* (Bruscato *et al.*, 2019).

El análisis termo gravimétrico muestra que el hongo ha producido cambios estructurales y de composición a la fibra de caña ya que la segunda etapa que se observa en la curva de TGA muestra la degradación de la celulosa más la hemicelulosa residual la curva se superpone entre sí formando un pico más plano menos pronunciado debido a que ha sido degradada cierta cantidad de celulosa y hemicelulosa por las enzimas celulasas, hemicelulasas y por enzimas de división de oligosacáridos, es decir, glicosidasas producidas por las hifas del hongo *G. lucidum* (Popescu *et al.*, 2010).

En la tercera etapa la interacción hongo fibra dio lugar a una temperatura más baja y a una mayor velocidad de degradación como se refleja en la curva ya que está más pronunciada respecto a la obtenida con la fibra de bagazo de caña, este cambio se da debido a la descomposición de la lignina y a la despolimerización de la caña causada por el hongo de pudrición blanca (Zeng *et al.*, 2012).

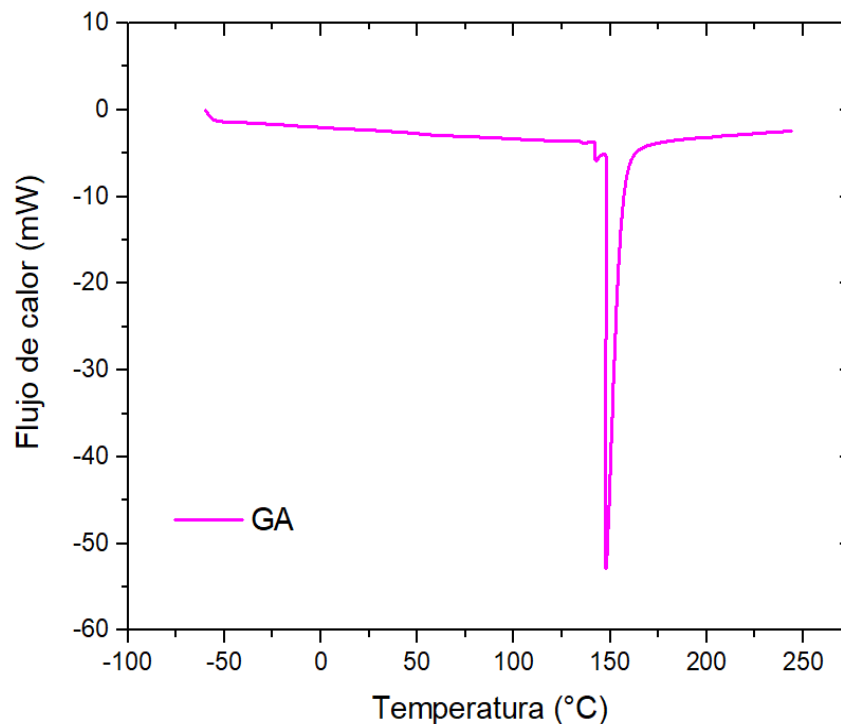
**Figura 40.** TGA y DTG para el material espumado



Es así que gracias a la acción del hongo de podredumbre blanca la lignina pudo tener al menos tres reacciones de degradación; la primera escisión oxidativa de las cadenas laterales de propilo entre los carbonos alfa y beta que conducen a la formación de ácidos benzoicos; la segunda reacción pudo ser escisión de enlaces b-aril éter y modificación de la estructura de la cadena lateral; por último, degradación de núcleos aromáticos a través de la apertura del anillo oxidativo. Y en general, los hongos de podredumbre blanca dependen principalmente de enzimas hidrolíticas y oxidativas extracelulares secretadas para degradar la lignina (Yang *et al.*, 2010).

La figura 41 de DSC para el material compuesto muestra una  $T_g$  de 142,57 °C, una  $T_m$  de 147,67 °C y una entalpía de 142,9 J/g. La interacción entre la matriz y la fibra de refuerzo hizo que la  $T_g$  aumente debido a que se debe eliminar el agua total de la fibra y el micelio. Mientras que el cambio a estado líquido se dio a menor temperatura seguramente por la degradación causada por el hongo.

Figura 41. DSC para material espumado



Al analizar los resultados en conjunto puede decirse que los 4 ensayos realizados presentaron comportamientos diferentes en el análisis termo gravimétrico. Se observa una clara diferencia del poliestireno con respecto a las 3 muestras de origen biológico en donde el material sintético presenta una mayor estabilidad térmica es decir que es necesaria una mayor temperatura para lograr la degradación del material (Camassola, 2019) Los resultados del ensayo de degradación de EPS son similares a los obtenidos por (Borsoi, Scienza, y Zattera, 2013)

Figura 42. DTG de las cuatro muestras

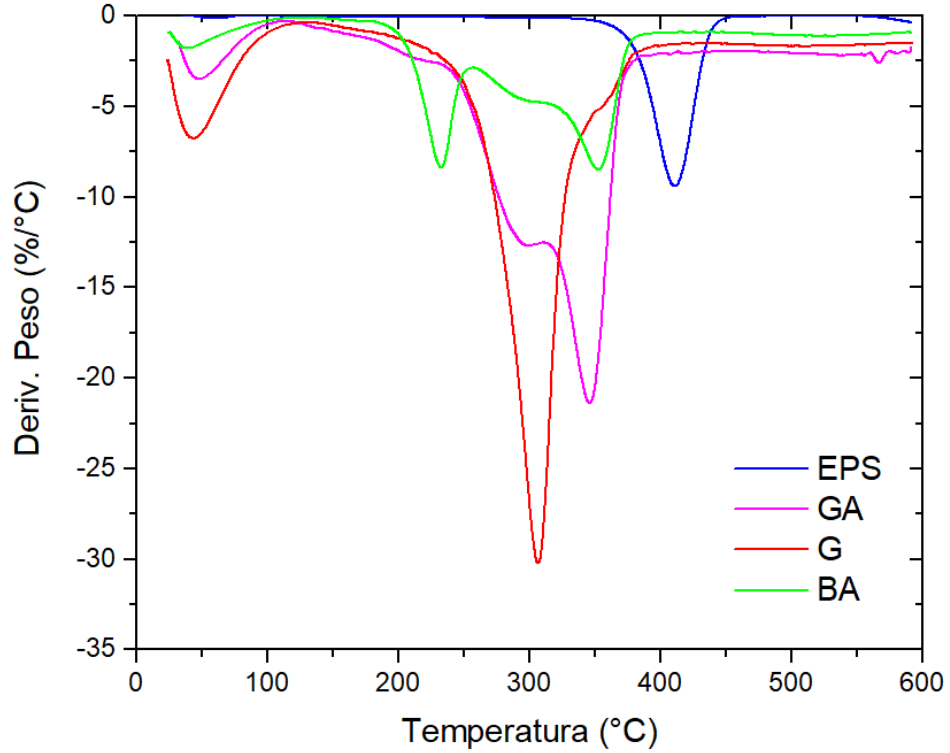
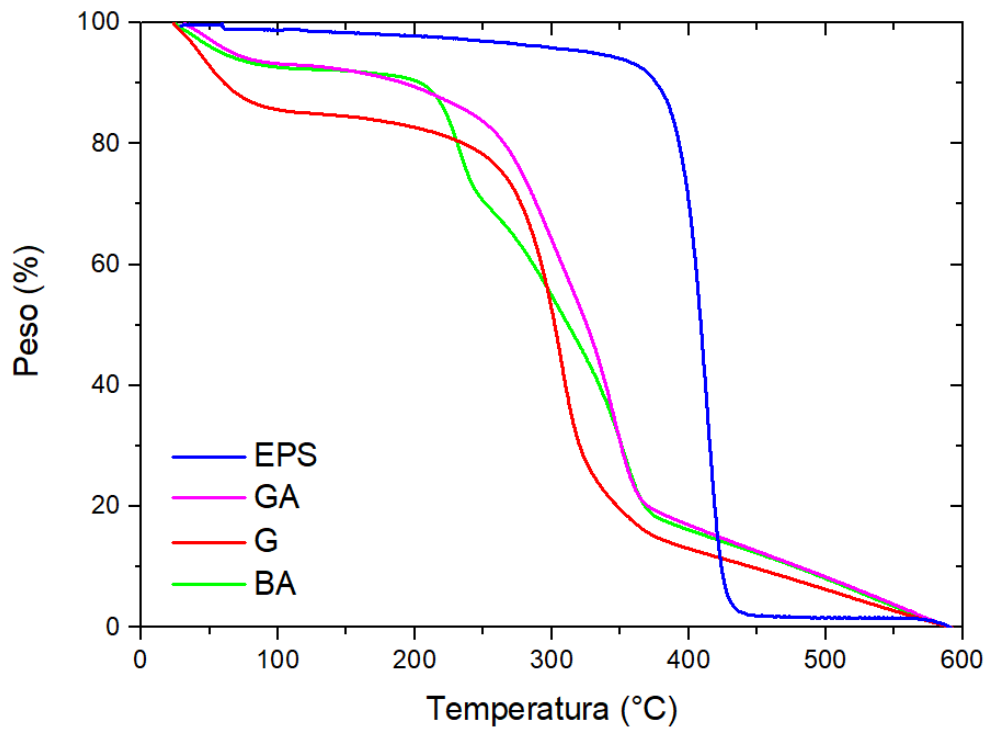


Figura 43. TGA de las cuatro muestras



Por otra parte, puede decirse que la interacción del hongo y la fibra ocasionan cambios notorios en la estabilidad térmica de los elementos que conforman el material biocompuesto. Debido a la acción natural del *G. lucidum* en la fibra de bagazo de caña se da inicialmente una degradación enzimática de compuestos lignocelulósicos.

Entre los cambios más relevantes al comparar los termogramas (Figuras 42-43) de GA, BA y G podría hablarse de un aumento de aproximadamente 60 °C en la temperatura de degradación de hemicelulosa y celulosa de GA en comparación con BA posiblemente debido a la remoción biológica de hemicelulosa. Así mismo la temperatura de degradación de la lignina no tuvo una variación entre GA con respecto a BA, pero su velocidad de degradación aumento en general en todos los puntos o picos presentes en el termograma (Figura 42-43) ya que la acción del hongo en los residuos lignocelulósicos ocasiona que estos sean más accesibles y por ende se facilite la degradación térmica (Appels *et al.*, 2019). Por el contrario, la velocidad de degradación de G disminuye al unirse a un sustrato.

#### 4. CONCLUSIONES

La composición de los sustratos es un factor fundamental para el desarrollo y crecimiento de las hifas. El fique al poseer saponinas que actúan como fungicidas inhibieron el crecimiento de la cepa fúngica aun después del lavado previo, la fibra de coco posee alto contenido de lignina y su degradación es compleja debido a que es un proceso biológico muy difícil de controlar, la caña demostró ser un mejor sustrato ya que su contenido de lignina no era tan alto además no contiene sustancias antimicóticas que dañen el hongo.

La relación de aspecto de las fibras no mostró diferencias significativas entre tamaño de mallas por lo tanto se tomó el tamiz 16, 50 y fondos como referencia para realizar los ensayos.

En los medios de cultivo con fibra de coco, fibra de bagazo de fique y fibra de bagazo de caña hubo crecimiento de *G. lucidum* a diferentes velocidades logrando colonizar la totalidad de la caja de Petri, pero estos resultados no se vieron reflejados en los moldes usados para obtener los especímenes para las pruebas físico mecánicas, por lo tanto los especímenes de fibra de coco y fibra de bagazo de fique no crecieron lo suficiente como para realizarles las pruebas de resistencia a la flexión y compresión ni densidad, debido a la falta de aire lo que condujo a reducir la capacidad deslignificadora del hongo.

El hongo creció de manera irregular en los moldes causando que las pruebas mecánicas tuvieran una desviación estándar alta especialmente la prueba de resistencia a la flexión lo que hace que el tipo de hongo y el grosor de su piel fúngica influyan en los resultados de las pruebas mecánicas. Así mismo la variabilidad de la densidad está directamente relacionada con la respuesta a la resistencia a la compresión y flexión de la bioespuma

La respuesta de compresión esfuerzo vs deformación para el tratamiento con caña tamiz 16 fue el que más se asemejó al poliestireno expandido con un esfuerzo de compresión promedio de 53,870 KPa y un módulo de Young de 189,353 KPa lo cual quiere decir que es más rígido y soporta una mayor carga antes de su ruptura.

El biomaterial compuesto es una buena opción para el reemplazo del poliestireno expandido como material de embalaje debido a sus características físico- mecánicas que no están tan alejadas de la realidad.

La característica de biodegradabilidad del material se lo dan sus dos componentes ya que posee una matriz fúngica de origen biológico y fibras de refuerzo igualmente biodegradables.

## 5. RECOMENDACIONES

Diseñar mejores procesos de adecuación de las materias primas como procesos de lavado de fique que involucre un menor consumo de agua y un menor tiempo de lavado. Así mismo, realizar un proceso de deslignificación a las fibras de coco por hidrólisis básica o explosión de vapor que permita un mejor crecimiento del micelio fúngico.

Utilizar un proceso de separación de fibras diferente al tamizado ya que este no permite una correcta clasificación debido a que su función principal es la clasificación de partículas y no de fibras.

Utilizar fibras más largas que permitan una buena disposición del oxígeno dentro del material compuesto.

Adecuar en el sustrato una relación Carbono - Nitrógeno superior a 50 que es la adecuada para el crecimiento de hongos de pudrición blanca.

Utilizar moldes que permitan un mejor intercambio de oxígeno entre el exterior y el interior del material biocompuesto.

Determinar una relación de aspecto de las fibras que permita un equilibrio entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión ya que estas son inversamente proporcionales.

Realizar ensayos de biodegradación que permitan determinar con claridad el tiempo de descomposición del material.

Realizar ensayos con otro tipo de hongos de pudrición blanca como pueden ser *P. sanguineus*, *L. velutinus*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Cyathus stercoreus*, *Phlebia sp.*, ya que han mostrado buenos resultados en otros estudios realizados. (Camassola; 2019) (Qin *et al.*, 2013).

Realizar pruebas FTIR que permitan caracterizar la naturaleza química de las películas y analizar su comportamiento al crecer en diferentes sustratos.

Realizar pruebas de absorción de agua y diseñar un recubrimiento que permita una mejor resistencia a la humedad.

## BIBLIOGRAFÍA

ABHIJITH, R., ASHOK, A., & REJEESH, C. R. Sustainable packaging applications from mycelium to substitute polystyrene: *Materials Today: Proceedings*. Vol. 5, No. 1, (2018), pág. 2139–2145.

AGUIRRE, E.; ULLOA, M.; AGUILAR, S.; CIFUENTES, J. Y VALENZUELA, R. Biodiversidad de hongos en México. En: *Revista Mexicana de Biodiversidad*. Vol. 85, (2014), pág. 76–81.

ALBELLA, J. M., CINTAS, A. M., MIRANDA, T. Y SERRATOSA, J. M. Introducción a la ciencia de materiales. Técnicas de preparación y caracterización, 1993, pág. 749. Disponible en internet en : En internet disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=LQdvFXZ6ndUC&pg=PA1&dq=Albella,+Cintas,+Miranda+%26+serratos,+1993&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjn3-opPkAhUqtlkKHdSHALkQ6AEIKDAA#v=onepage&q=Albella%2C%20Cintas%2C%20Miranda%20%26%20serratos%2C%201993&f=false>

ALZORQI, I., SUDHEER, S., LU, T., & MANICKAM, S. Ultrasonics Sonochemistry Ultrasonically extracted b - D -glucan from artificially cultivated mushroom, characteristic properties and antioxidant activity. *Ultrasonics – Sonochemistry*. Vol. 35, (2017), pág. 531–540. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.04.017>

APPELS, F. V. W., CAMERE, S., MONTALTI, M., KARANA, E., JANSEN, K. M. B., DIJKSTERHUIS, J., WÖSTEN, H. A. B. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials & Design*. Vol. 161, (2019), pág. 64–71.

ARDÓN, C. *La producción de hongos comestibles* (tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Ciudad de Guatemala. (2007).

ARIFIN, Y. H., & YUSUF, Y. Mycelium fibers as new resource for environmental sustainability. *Procedia Engineering*. Vol. 53, (2013), pág. 504–508.

ASTM C 203. Standard Test Methods for Breaking Load and Flexural Properties of Block-Type Thermal Insulation; ASTM International: West Conshohocken. (2017).

ASTM D 1621 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics. (2016).

ASTM D1622 Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics (2014).

ASTM D3418 Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry (2015).

ASTM D3748-14 Standard Practice for Evaluating High-Density Rigid Cellular Plastics. (2019).

ASTM E1131-08 Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. (2014).

ATILA, F. Acta Ecologica Sinica Comparative study on the mycelial growth and yield of *Ganoderma lucidum* (Curt .: Fr .) Karst on different lignocellulosic wastes. Acta Ecologica Sinica, (2018), pág. 1–5.

ATUHAIRE, A. M., KABI, F., OKELLO, S., MUGERWA, S., & EBONG, C. Optimizing biophysical conditions and pre-treatment options for breaking lignin barrier of maize stover feed using white rot fungi. Animal Nutrition. Vol. 2, No. 4, (2016), pág. 361–369. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.08.009>

AYRILMIS, N., KAYMAKCI, A., AKBULUT, T., & ELMAS, G. M. Mechanical performance of composites based on wastes of polyethylene aluminum and lignocellulosics. Composites Part B: Engineering. Vol. 47, (2013), pág. 150–154.

BARBA, M., ASSUMPC, F., ÁVILA, S., SILVEIRA, P., JU, A. M., & HOFFMANN, R. Factors affecting mushroom *Pleurotus spp.* Saudi Journal Biological Sciences. Vol. 26, No. 4, (2019), pág. 633–646. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.12.005>

BEJU, Y. Z., & MANDAL, J. N. Expanded polystyrene (EPS) geof foam: preliminary characteristic evaluation. Procedia Engineering. Vol. 189, (2017), pág. 239–246. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.038>



BINTI, R., TAKAGI, H., & NORIO, A. Tensile and flexural properties of polylactic acid-based hybrid green composites reinforced by kenaf, bamboo and coir fibers. *Industrial Crops & Products*. Vol. 94, (2016), pág. 562–573.

BORSOI, C., SCIENZA, L. C., & ZATTERA, A. J. Characterization of Composites Based on Recycled Expanded Polystyrene Reinforced with Curaua Fibers. *Journal of Applied Polymer Science*. Vol. 128, No. 1, (2013), pág. 653–659.

BRIGANTE, D. New composite materials: Selection, design, and application. *New Composite Materials: Selection, Design, and Application*, Vol. 1, (2014).

BRUSCATO, C., MALVESSI, E., BRANDALISE, R. M. Y., & CAMASSOLA, M. High performance of macrofungi in the production of mycelium-based biofoams using sawdust d Sustainable technology for waste reduction. *Cleaner Production*. Vol. 121, (2019), pág. 225–232. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.150>

BOHACZ, J. Microbial strategies and biochemical activity during lignocellulosic waste composting in relation to the occurring biothermal phases. *Journal of Environmental Management*. Vol. 206, (2018), pág. 1052–1062.

CAI, P., LI, Z., WANG, T., & WANG, Q. Effect of aspect ratios of aramid fiber on mechanical and tribological behaviors of friction materials. *Tribology International*. Vol. 92, (2015), pág. 109–116. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.05.024>

CHANDRAMOHAN, N. K. Materials Today proceedings variation in compressive and flexural strength of the carbon epoxy composites with the addition of various fillers to the epoxy resin. *Materials Today: Proceedings*, (2019), pág. 6–10.

CICHOSZ, S., & MASEK, A. Cellulose structure and property changes indicated via wetting-drying cycles. *Polymer Degradation and Stability*. Vol. 167, (2019), pág. 33–43. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.033>

MINISTERIO DE AGRICULTURA. Cadena nacional del coco. Indicadores e Instrumentos. El Ministerio. Bogotá: 2016a.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Cadena nacional del fique. Indicadores e Instrumentos. El Ministerio. Bogotá: 2016b.

CORTÉS, W. Lignocellulosic materials as source of biofuels and chemical. En: Ciencia y Tecnología Aeronáutica. Vol. 16, 2011, pág. 41–46.

CRONIN, D. S., & OUELLET, S. Low density polyethylene, expanded polystyrene and expanded polypropylene: Strain rate and size effects on mechanical properties. Polymer Testing, Vol. 53, (2016), pág. 40–50.

DA COSTA, V., SANTOS, S. F., MÁRMOL, G., DA SILVA, A., & SAVASTANO, H. Potential of bamboo organosolv pulp as a reinforcing element in fiber-cement materials. Construction and Building Materials. Vol. 72, (2014), pág. 65–71. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.005>

DEACON, J. Fungal Biology. Climate Change. En: The Physical Science Basis. Vol. 7, (2015).

DEARMITT, C. Functional Fillers for Plastics. In Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition), (2017), <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8/00023-7>

DE GARCÍA, C. & CARIDAD, MARÍA. Biología de hongos. (2012), Pág. 520. Recuperado En internet disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=pS2RDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

DE OLIVEIRA CRUZ, L. M., STEFANUTTI, R., FILHO, B. C., & TONETTI, A. L. Coconut shells as filling material for anaerobic filters. SpringerPlus. Vol. 2, No.1, (2013), pág. 1–6. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-655>

DE SOUZA, M., PERRONE, O. M., CARREIRA, DA C., TABOGA, S., BOSCOLO, M., SILVA, R., & GOMES, E. Effect of pretreatment and enzymatic hydrolysis on the physical-chemical composition and morphologic structure of sugarcane bagasse and sugarcane straw. Bioresource Technology. Vol. 219, (2011), pág. 773–777. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.075>

DHYANI, V., & BHASKAR, T. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. Renewable Energy. Vol. 129, (2018), pág. 695–716.

DONALD.ASKELAND. Ciencia.e.Ingenieria.de.los.Materiales, (1998), pág. 468.

DUBEY, N.; AGNIHOTRI, G.; PUROHIT, R. Y SINGH, S.K. Investigation of midrib of *Cocos nucifera* leaves for reinforcement of polyester. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 4, No. 2, (2017), pág. 3346–3355.

ECHEVERRI, R. D., FRANCO, L.M. & GONZÁLEZ, M.R. Fique en Colombia. Instituto Tecnológico Metropolitano. (2015) En internet disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=KdkDwAAQBAJ&dq=fique+saponinas&hl=es&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.co/books?id=KdkDwAAQBAJ&dq=fique+saponinas&hl=es&source=gbs_navlinks_s)

FERNANDES, E. M., CORRELO, V. M., MANO, J. F., & REIS, R. L. Novel cork-polymer composites reinforced with short natural coconut fibres: Effect of fibre loading and coupling agent addition. *Composites Science and Technology*. Vol. 78, (2013), pág. 56–62.

FUENTES, C., & ACOSTA, J. Estudio de materiales compuestos de cemento, papel reciclado, quitosano y fibra de sisal para la fabricación de calaminas y paneles utilizados en la construcción de viviendas económicas. (2006).

FUKASAWA, Y. Temperature effects on hyphal growth of wood-decay basidiomycetes isolated from *Pinus densiflora* deadwood. *Mycoscience*. Vol. 59, No. 3, (2015), pág. 259–262.

GEORGE, U. A., & ELVIS, M. M. Materials Science for Energy Technologies Optimization of flexural strength of palm nut fibre concrete using Scheffe ' s theory. *Materials Science for Energy Technologies*. Vol. 2, (2019), pág. 272–287. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.01.006>

GIL, N. D., SEGURA, M. A., SORIANO, G., NERI, J., LÓPEZ, N., MAS, E., BALLESTEROS, M. F. Dissolution and recovery of waste expanded polystyrene using alternative essential oils. *Fuel*. Vol. 239, (2019), pág. 611–616.

GRANADOS, D., Y LOPEZ, G. Manejo de la palma de coco (*Cocos nucifera* L.) en México. En: *Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. 8, (2002), No. 1, pág. 39–48.

GREENPEACE. Plásticos en los océanos: datos, comparativas e impactos [en línea]. *Dossier de Prensa*, 7. 2016 citado junio, 2018. En internet disponible en: [http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/2016/report/plasticos/plasticos\\_en\\_los\\_oceanos\\_LR.pdf](http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/2016/report/plasticos/plasticos_en_los_oceanos_LR.pdf)

GUIMARÃES, J. L., FROLLINI, E., SILVA, C. G., WYPYCH, F., & SATYANARAYANA, K. G. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. *Industrial Crops & Products*, Vol. 30, (2009), pág. 407–415. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.013>

GURUNG, O. K., BUDATHOKI, U., & PARAJULI, G. Effect of Different Substrates on the Production of *Ganoderma lucidum* (Curt.: Fr.) Karst. *Our Nature*. Vol. 10, No. (1), (2013), pág. 191–198. En internet disponible en: <https://doi.org/10.3126/on.v10i1.7781>

HANEEF, M., CESERACCIU, L., CANALE, C., BAYER, I. S., HEREDIA, J. A., & ATHANASSIOU, A. Advanced Materials From Fungal Mycelium Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Nature Publishing Group*, (January), 2017, 1–11.

HASSAINIA, A., SATHA, H., & BOU, S. Chitin from *Agaricus bisporus*: Extraction and characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*. Vol. 117, (2018), pág. 1334–1342.

HAWASH, S.I.; FARAH, J.Y. & EL-DIWANI, G. Pyrolysis of agriculture wastes for bio-oil and char production. En: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. Vol. 124, (2017), pág. 369–372.

HIDALGO-SALAZAR, M. A., & CORREA, J. P. Mechanical and thermal properties of biocomposites from nonwoven industrial Figue fiber mats with Epoxy Resin and Linear Low Density Polyethylene. *Results in Physics*. Vol. 8, 2018, pág. 461–467

HOLT, G. A., MCINTYRE, G., FLAGG, D., BAYER, E., WANJURA, J. D., & PELLETIER, M. G. Fungal mycelium and cotton plant materials in the manufacture of biodegradable molded packaging material: Evaluation study of select blends of cotton byproducts. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. Vol. 6, No. 4 (2012), pág. 431–439.

HSIEH, C., & YANG, F. C. Reusing soy residue for the solid-state fermentation of *Ganoderma lucidum*. *Bioresource Technology*. Vol. 91, No. 1. (2004), pág. 105–109. [10.1016/S0960-8524\(03\)00157-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00157-3)

HSIEH, W., CHENG, W., CHEN, L., & LIN, S. Non-isothermal dehydration kinetic study of aspartame hemihydrate using DSC, TGA and DSC-FTIR microspectroscopy. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*. Vol. 13, No. 3, 2018, pág. 212–219. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2017.12.001>

ILLANA C. Hifas De Hongos Como Material De Empaquetado Y De Construcción. *Yesca*. Vol. 26, (2014), pág. 21-26.

IMBACHI J, MORALES S, A. N. Utilización del subproducto de fique: licor verde, como controlador de plagas en un cultivo de repollo (*Brassica oleracea*). Vol. 10, No.1, (21012), pág. 109–115.

ISLAM, M. R., TUDRYN, G., BUCINELL, R., SCHADLER, L., & PICU, R. C. Stochastic continuum model for mycelium-based bio-foam. *Materials & Design*. Vol. 160, (2018), pág. 549–556. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.046>

ITO, S., IHARA, T., TAMURA, H., TANAKA, S., IKEDA, T., KAJIHARA, H., DISSANAYAKE, C., ABDEL-MOTAAL, F. F. AND ELSAYED, M. A. alpha-tomatine, the major saponin in tomato, induces programmed cell death mediated by reactive oxygen species in the fungal pathogen *Fusarium oxysporum*. *Febs Letters*. Vol. 581, No. 17, (2007), pág. 3217-3222.

JONES, M., BHAT, T., HUYNH, T., KANDARE, E., YUEN, R., CHUN, H., & SABU, J. Waste - derived low - cost mycelium composite construction materials with improved fire safety. (2018), pág. 816–825. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1002/fam.2637>

JONES, M., HUYNH, T., DEKIWADIA, C., DAVER, F. & JOHN, S. Mycelium composites: A review of engineering characteristics and growth kinetics. *Journal of Bionanoscience*. Vol. 11, (2017), pág. 241-257.

KAGIMURA, F. Y., ANTÔNIO, M., CUNHA, A., THEIS, T. V, MALFATTI, C. R. M., DEKKER, R. F. H. y SALOMÉ, K. characterization and antioxidant evaluation. *Carbohydrate Polymers*. Vol. 127, (2015), pág. 390–399. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.045>

KANNAN, P., BIERNACKI, J. J., VISCO, D. P., & LAMBERT, W. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Kinetics of thermal decomposition of expandable polystyrene in different gaseous environments*. Vol. 84, (2009), pág.139–144. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.01.003>

KAR, K. K. *Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. (2017).

KIND, T., GSCHAEDLER, A., SILVERIA, M., ARRIZON, J., FIEHN, O., VALLEJO, A., LUGO, E. Effect of steroidal saponins from Agave on the polysaccharide cell wall composition of *Saccharomyces cerevisiae* and *Kluyveromyces marxianus*. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 77, 430–439. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.048>

KOSTIKOV, V. I., & KILIN, V. S. Metal Matrix Composites. *Handbook of Composites*, (1998), pág. 291–306.

LAZARIDOU, A., BILIADERIS, C. G., & KONTOGIORGOS, V. Molecular weight effects on solution rheology of pullulan and mechanical properties of its films. *Carbohydrate Polymers*. Vol. 52, No. 2, (2003), pág. 151–166.

LING, C., CARDI, P., & GILCHRIST, M. D. Mechanical behaviour of EPS foam under combined compression-shear loading. Vol. 16, (2018), pág. 339–352.

LIU, Y. A. simple thermodynamic approach for derivation of a general Monod equation for microbial growth. *Biochemical Engineering Journal*. Vol. 31, No. 1, (2006), pág. 102–105.

LÓPEZ, J., MÉNDEZ, J., RUELAS CHACÓN, X., & NÁJERA, J. Assessment of Edible Fungi and Films Bio-Based Material Simulating Expanded Polystyrene. *Materials and Manufacturing Processes*. Vol. 31, No.8, (2016), pág.1085–1090.

LUCENIUS, J., VALLE, J., PARIKKA, K., & ÖSTERBERG, M. Journal of Colloid and Interface Science Understanding hemicellulose-cellulose interactions in cellulose nanofibril-based composites. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 555, (2019), pág 104–114.

MANAVALAN, T., MANAVALAN, A., & HEESE, K. Characterization of Lignocellulolytic Enzymes from White-Rot Fungi. *Current Microbiology*. Vol. 70, No. 4, (2015), pág. 485–498.

MCKEEN, L. W. *Film Properties of Plastics and Elastomers 2 Introduction to the Mechanical , Thermal , and Permeation Properties of Plastics and Elastomer Films*, (2017)

MERKEL, K., RYDAROWSKI, H., KAZIMIERCZAK, J., & BLODA, A. Processing and characterization of reinforced polyethylene composites made with lignocellulosic fibres isolated from waste plant biomass such as hemp. *Composites Part B: Engineering*. Vol. 67, (2014), pág. 138–144.

MEZA, A., & SIDDIQUE, S. Effect of aspect ratio and dosage on the flexural response of FRC with recycled fiber. *Construction and Building Materials*. Vol. 213, (2019), pág. 286–291.

MILEIKO, S. T. Metal and ceramic based composites. In Elsevier science, Vol. 6. (1997), Moscow. Russia.

MONTEIRO, S. N., CALADO, V., RODRIGUEZ, R. J. S., & MARGEM, F. M. Thermogravimetric stability of polymer composites reinforced with less common lignocellulosic fibers - An overview. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol 1 No. 2, (2012), pág. 117–126.

MUÑOZ, M., HIDALGO, M., & MINA, J. Fique Fiber an Alternative for Reinforced Plastics. Influence of Surface Modification. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*. Vol. 12, No. 2, (2014), pág. 60–70

NARON, D., COLLARD, F., TYHODA, L., & GÖRGENS, J. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Production of phenols from pyrolysis of sugarcane bagasse lignin: Catalyst screening using thermogravimetric analysis – Thermal desorption – Gas chromatography – Mass spectroscopy. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 138, (2019), pág. 120–131. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.12.015>

NAVIA, D. P., & AYALA, A. A. Biocompuestos de Harina de Yuca obtenidos por Termo-Compresión. Efecto de las Condiciones de Proceso Cassava Flour Biocomposites made by Thermopressing. Effect of Processing Conditions. *Información Tecnológica*. Vol. 26, No. 5, (2015), pág. 55–62. En internet disponible en: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000500008>

NIÑO, J.C. Evaluación de metabolitos secundarios del hongo *Ganoderma lucidum* con actividad antifúngica frente a *Fusarium* spp. de interés clínico. En: *Journal of Chemical Information and Modeling*. Vol. 53, No. 9, (2013), pág.1689–1699.

NÚÑEZ, C., ROCA, A. Y JORBA, J. Comportamiento mecánico de los materiales. volumen 2. ensayos mecánicos, ensayos no destructivos. 2da edición, (2013), pág. 15-43.

OSORIO, J., VARÓN, F. Y HERRERA, J. Mechanical behavior of the concrete reinforced with sugar cane bagasse fibers. *DYNA*, Vol. 74, No. 153, (2007), pág. 69–79.

OSPINA, S., DAVID, R., DIANA, E., CLAUDIA, O., DIEGO, R., PAOLA, Z., & ATEHORTÚA, L. Comparison of Extraction Methods of Chitin from *Ganoderma lucidum* Mushroom Obtained in Submerged Culture. *BioMed Research International*, (2014), pág. 1–7.

OTTO, G. P., MOISÉS, M. P., CARVALHO, G., RINALDI, A. W., GARCIA, J. C., RADOVANOVIC, E., & FÁVARO, S. L. Mechanical properties of a polyurethane hybrid composite with natural lignocellulosic fibers. *Composites Part B: Engineering*. Vol. 110, (2017), pág. 459–465.

OWAID, M. N., JALOOT, A. S., & AHMED, D. M. Influence of *Ficus carica* and *Olea europaea* leaves extracts on the mycelial growth of mushrooms in vitro. *Acta Ecologica Sinica*. Vol. 39, No. 1, (2018). pág. 36–41.

PARK, S. J. Y SEO, M. K. Types of Composites. *Interface Science and Technology*. Vol. 18, (2011), pág. 501-629. En internet disponible en: <https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1016/B978-0-12-375049-5.00007-4>

PATRA, A. K. *Dietary phytochemicals and microbes*. Kolkata. India. Springer, (2012).

PELLETIER, M. G., HOLT, G. A., WANJURA, J. D., BAYER, E., & MCINTYRE, G. An evaluation study of mycelium based acoustic absorbers grown on agricultural by-product substrates. *Industrial Crops & Products*. Vol. 51, (2013), pág. 480–485. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.09.008>

PEREIRA, G., CAMPOS, J., CHÁVEZ, D., ANABALÓN, L. Y ARRIAGADA, C. Caracterización del crecimiento micelial del hongo ectomicorrícico. Vol. 22, (2014), pág. 30–39.

PERKINELMER INC. Thermogravimetric Analysis (TGA). Retrieved (April 25, 2019), En internet disponible en: [https://www.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/faq\\_beginners-guide-to-thermogravimetric-analysis\\_009380c\\_01.pdf](https://www.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/faq_beginners-guide-to-thermogravimetric-analysis_009380c_01.pdf)

PHINICHKA, N., & KAENTHONG, S. Regenerated cellulose from high alpha cellulose pulp of steam-exploded sugarcane bagasse. *Integrative Medicine Research*, 2017, 7(1), 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.04.003>

PONTÓN, J. La pared celular de los hongos y el mecanismo de acción de la anidulafungina. *Revista Iberoamericana de Micología*. Vol. 25, No. 2, (2008), pág. 78–82.



POPESCU, C., LISA, G., MANOLIU, A., GRADINARIU, P., & VASILE, C. Thermogravimetric analysis of fungus-degraded lime wood. *Carbohydrate Polymers*. Vol. 80, No. 1, (2010), pág. 78–83. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.058>

PORRAS CÁRDENAS, M. E., MUÑOZ VÁSQUEZ, C. P., GIL PILONIETA, A. M., & QUINTANA MARÍN, G. C. Obtención De Espumas De Poliuretano Con Materiales Lignocelulósicos. Vol. 6, No. 2, (2012), pág. 93–102. En internet disponible en: <http://revistas.upb.edu.co/index.php/investigacionesaplicadas/article/view/1504>

PRADEEP, S., SUGANYA, D. S., SUBRAMANIAN, S., & JAYAPRIYA, J. Bio-softening of mature coconut husk for facile coir recovery. *Indian Journal of Microbiology*. Vol. 47, No. 2, (2007), pág.164–166.

PRATT, S., LANT, P. A., & LAYCOCK, B. The Role of Biodegradable Plastic in Solving Plastic Solid Waste Accumulation. In *Plastics to Energy*. (2019), pág, 473-210. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813140-4.00019-4>

PUENTES, D., & NELLY, L. Interacciones moleculares entre plantas y microorganismos: saponinas como defensas químicas de las plantas y su tolerancia a los microorganismos. Una revisión – a review. *Revista de Estudios Transdisciplinarios*. Vol.1, No. 2, (2009), pág. 32–55.

QIN, X., SHUI, J., ZHU, N., TAO, E., & LI, H. Bioresource Technology Sugarcane bagasse degradation and characterization of three white-rot fungi. *Bioresource Technology*. Vol 131, (2013), pág. 443–451. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.182>

QUINTERO, M.; CASTRO, L.; ORTIZ, C.; GUZMÁN, C. Y ESCALANTE, H. Enhancement of starting up anaerobic digestion of lignocellulosic substrate: Figue's bagasse as an example. En: *Bioresource Technology*. Vol. 108, (2012), pág. 8–13.

QUIÑONEZ, M.V. Uso de la fibra de coco como sustrato en la producción de Pascua (*Euphorbia pulcherrima*) para exportación. Universidad Rafael Landívar. (2014).

RAJAN, A., ABRAHAM, T. E., & ABRAHAM, T. E. Coir Fiber Process and Opportunities Coir Fiber – Process and Opportunities : Part 2. *Journal of Natural Fibers*. (2008), pág. 1–11. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1300/J395v04n0>

RASHAD, F. M., KATTAN, M. H. E., FATHY, H. M., EL-FATTAH, D. A. A., TOHAMY, M. EL, & FARAHAT, A. A. Recycling of agro-wastes for *Ganoderma lucidum* mushroom production and *Ganoderma post* mushroom substrate as soil amendment. *Waste Management*, Vol. 88, (2019), pág.147–159.

RICHARDS, V. L., & LEKAKH, S. N. Thermal decomposition studies of eps foam, polyurethane foam , and epoxy resin (sla) as patterns for investment casting ; analysis of hydrogen cyanide (hcn) from thermal degradation of polyurethane. *International Journal of Metalcasting*. Vol. 13, No. 1, (2019), pág. 17–24.

RODRÍGUEZ, N., JARAMILLO, C. *Cultivo de Hongos Medicinales en Residuos Agrícolas de la Zona Cafetera*, Chinchiná, Caldas, Colombia: Cenicafé, (2005).

SABA, N., JAWAID, M., & SULTAN, M. T. H. An overview of mechanical and physical testing of composite materials. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, (2018).

SALTOS, P., CHANGO, I., ALDÁS, M., & QUIROZ, F. Reciclaje de poliestireno expandido por el método de disolución precipitación. *Revista Politécnica*. Vol. 36, No. 2, (2015), 1–9.

SAMPER, M., RICO, M., FERRANDIZ, S., & LÓPEZ, J. Reducción y caracterización del residuo de poliestireno expandido. *Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, , Vol.1, (2008), pág. 1–8.

SÁNCHEZ, C. Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. En: *Biotechnology Advances*. Vol. 27, No. 2, (2009), pág.185–194.

SÁNCHEZ-SAFONT, E. L., ALDUREID, A., LAGARÓN, J. M., GÁMEZ-PÉREZ, J., & CABEDO, L. Biocomposites of different lignocellulosic wastes for sustainable food packaging applications. *Composites Part B: Engineering*. Vol. 145, No. 1, (2018), pág. 215–225.

SANJAY, M. R., MADHU, P., JAWAID, M., SENTHAMARAIKANNAN, P., SENTHIL, S., & PRADEEP, S. Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 172, (2018), pág. 566–581

SANTOS, N., SILVA, M., & ALVES, J. Reinforcement of a biopolymer matrix by lignocellulosic agro-waste. *Procedia Engineering*, Vol. 200, (2017), pág. 422–427.

SELMAN-HOUSEIN, G., LÓPEZ, A., RAMOS, O., CARMONA, E. R., ARENCIBIA, A. D., & MENENDEZ, E. Towards the Improvement of Sugarcane Bagasse as Raw Material for the Production of Paper Pulp and Animal Feed. Genetic Engineering of Sugarcane Fiber. Plant Genetic Engineering, (2000), 189–193. En internet disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0168-7972\(00\)80030-4](https://doi.org/10.1016/S0168-7972(00)80030-4)

SENGUPTA, S., & BASU, G. Properties of Coconut Fiber. Materials Science and Materials Engineering. . (2017). En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04122-9>

SCHMITT, C.R.; ROSA, D.S.; VARGAS, B.P.; ROSA, C.H.; DUARTE, A.; SCHEEREN, C.W. Y ROSA, G.R. Coconut agro-industrial waste in the production of catalyst containing palladium: The report of a mini-project for teaching of sustainable Suzuki-Miyaura reaction. En: Journal of Cleaner Production, vol. 185, (2018), pág. 342–346.

SCOTT, G. Polymers in modern life. En: Polymers and the Environment. Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry. (1999), pág.1-18

SINGH NEE NIGAM, P., & PANDEY, A. Biotechnology for agro-industrial residues utilisation: Utilisation of agro-residues. In Biotechnology for Agro-Industrial Residues Utilisation: Utilisation of Agro-Residues, (2009), pág.164-187

STEPHEN, J. L., & PERIYASAMY, B. Innovative developments in biofuels production from organic waste materials: A review. Fuel, Vol. 214, (2018), pág. 623–633

STUPENENGO, F. Materiales compuestos. En: Materiales y Materias Primas, (2011), pág. 7–11.

TAN, R. B. H., & KHOO, H. H. Life cycle assessment of EPS and CPB inserts: Design considerations and end of life scenarios. Journal of Environmental Management. Vol 74, No. 3, (2005), pág.195–205. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.09.003>

TELIVELT, J., LINDNER, G., TEUFFEL, P., & LAMERS, H. The production process and compressive strength of Mycelium-based materials. University of Technology, (2015).

THARANATHAN, R. N. Biodegradable films and composite coatings: past present and future. Vol 14, (2003), pág. 71–78. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(02\)00280-7](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(02)00280-7)

TIAN, W., QI, L., ZHOU, J., & GUAN, J. Effects of the fiber orientation and fiber aspect ratio on the tensile strength of Csf /Mg composites. *Computational Materials Science*, Vol. 89, 2014, pág 6–11. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.03.004>

TORRES, A. M., QUINTERO, J. C., & GARCÉS, L. Effect of nutrients in the biomass production of the medicinal mushroom *Ganoderma lucidum*. *Revista Colombiana de Biotecnología*. Vol. 13, No. 1, (2011,) pág. 103–109.

TORTORA, G. J., FUNKE, B. R. & CASE, C. L. *Introducción a la microbiología*, ( 2007), Pág. 959. En internet disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=Nxb3iETuwpIC&dq=hongos+aerobios&hl=es&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.co/books?id=Nxb3iETuwpIC&dq=hongos+aerobios&hl=es&source=gbs_navlinks_s)

TRYGG, J., BELTRAME, G., & YANG, B. J. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, (2019), En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102206>

VALERY, V., & EVGENY, M. *Mechanics and Analysis of Composite Materials*. (Elsevier, Ed.). Amsterdam: Elsevier. (2001).

VILLADA, H ET Al. Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables. En: *Temas Agrarios*, Vol. 12, No. 2, (2007), pág. 5-13.

WANG, C., YANG, J., WEN, J., BIAN, J., LI, M., PENG, F., & SUN, R. International Journal of Biological Macromolecules Structure and distribution changes of Eucalyptus hemicelluloses during hydrothermal and alkaline pretreatments. *International Journal of Biological Macromolecules*. Vol. 133, (2019). Pág. 514–521. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.127>

WANG, R. M., ZHENG, S. R. Y ZHENG, Y. P. Reinforced materials. *Polymer Matrix Composites and Technology*, (2011), pág. 29-99. En internet disponible en: <https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1533/9780857092229.1.29>

WILSON, J. D. Y BUFFA A. J. *Física*. 5ta edición. (2003), pág. 842. En internet disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=KFEvYPsc5IMC&printsec=frontcover&dq=wilson+y+buffa&hl=es&sa=X&ved=0ahUKewi9lc-gufjhAhVPvFkKHQojBj8Q6AEIKzAA#v=onepage&q=wilson%20y%20buffa&f=false>

XIAO, P., & KONDO, R. Mycoscience Biodegradation and bioconversion of endrin by white rot fungi , *Phlebia acanthocystis* and *Phlebia brevispora*. *My Conscience*. (2019), pág. 2-7. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.myc.2019.04.004>

YANG, Z. J., ASCE, M., ZHANG, F., STILL, B., ASCE, S. M., WHITE, M., & AMSTISLAVSKI, P. Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam. *Journal of Materials in Civil*, (2017), Vol. 29, pág. 1–9.

YANG, X., MA, F., ZENG, Y., YU, H., XU, C., & ZHANG, X. International Biodeterioration & Biodegradation Structure alteration of lignin in corn stover degraded by white-rot fungus *Irpex lacteus* CD2. *International Biodeterioration & Biodegradation*, (2010), vol. 64, no. 2, pág. 119–123. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.12.001>

YANG, H., YAN, R., CHEN, H., ZHENG, C., LEE, D. H., & LIANG, D. T. In-Depth Investigation of Biomass Pyrolysis Based on Three Major Components : Hemicellulose , Cellulose and Lignin, (2006), no. 17, pág. 388–393.

ZENG, G. M., SHI, J. G., YUAN, X. Z., LIU, J., ZHANG, Z. B., HUANG, G. H., ... LIU, H. L. Effects of Tween 80 and rhamnolipid on the extracellular enzymes of *Penicillium simplicissimum* isolated from compost. *Enzyme and Microbial Technology*, (2006), vol. 39 no. 7, pág. 1451–1456.

ZENG, Y., YANG, X., YU, H., ZHANG, X., & MA, F. Bioresource Technology The delignification effects of white-rot fungal pretreatment on thermal characteristics of moso bamboo. *Bioresource Technology*, (2012), vol. 114, pág. 437–442. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.036>

ZHANG, B. B., & CHEUNG, P. A mechanistic study of the enhancing effect of Tween 80 on the mycelial growth and exopolysaccharide production by *Pleurotus tuber-regium*. *Bioresource Technology*, (2011), Vol. 102, no. 17, pág. 8323–8326. En internet disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.021>

## ANEXOS

### ANEXO A. Adecuación y caracterización de los residuos lignocelulósicos.

Figura 1. Recolección residuos lignocelulosicos de fique



Figura 3. Adecuación de los residuos lignocelulosicos de fique



Figura 2. Recolección residuos lignocelulosicos de caña de azúcar



Figura 4. Adecuación de los residuos lignocelulosicos de coco





Figura 5. Molienda de residuos lignocelulósicos



Figura 7. Secado de los residuos lignocelulósicos de fique



Figura 8. Lavado de residuos lignocelulósicos de fique



Figura 9. Criba utilizada en el proceso de molienda



Figura 10. Juego de tamices ubicado sobre el Ro-Tap



Figura 11. Estereoscopio usado en la caracterización de fibras



Figura 12. Proceso de medición de la relación de aspecto de los residuos lignocelulósicos

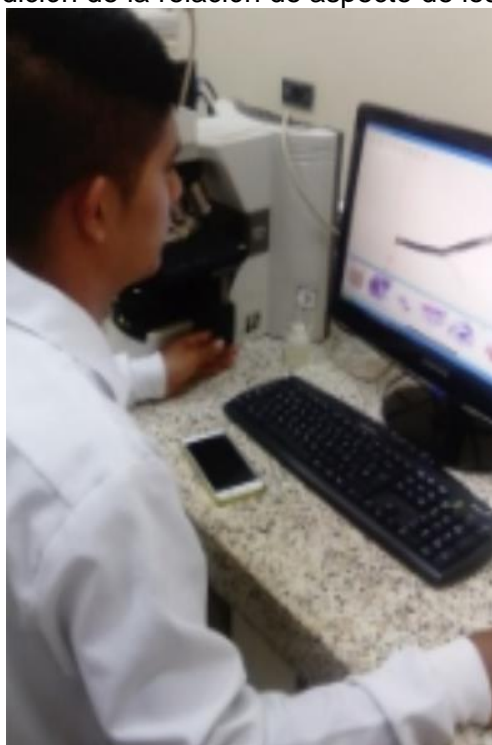




Figura 13. Bagazo de fique observado con estereoscopio retenido por la malla #16

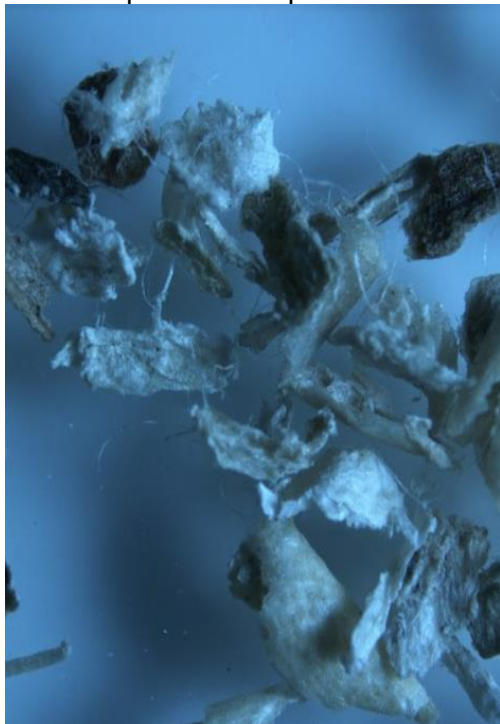


Figura 15. Bagazo de fique observado con estereoscopio retenido por la malla #50

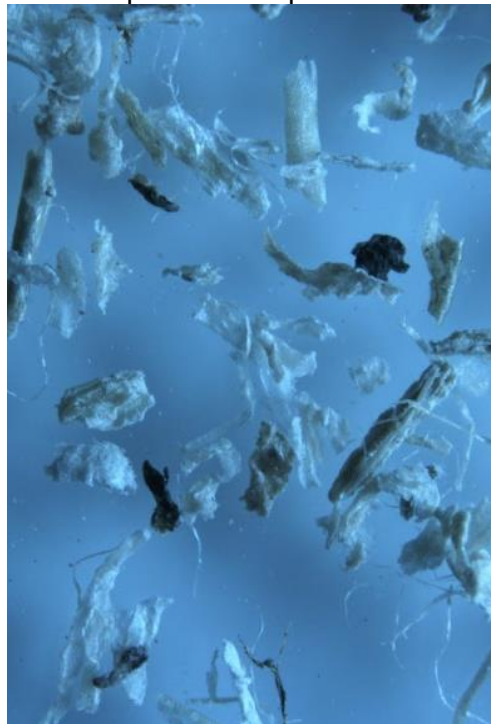


Figura 14. Bagazo de fique observado con estereoscopio retenido por la malla #30

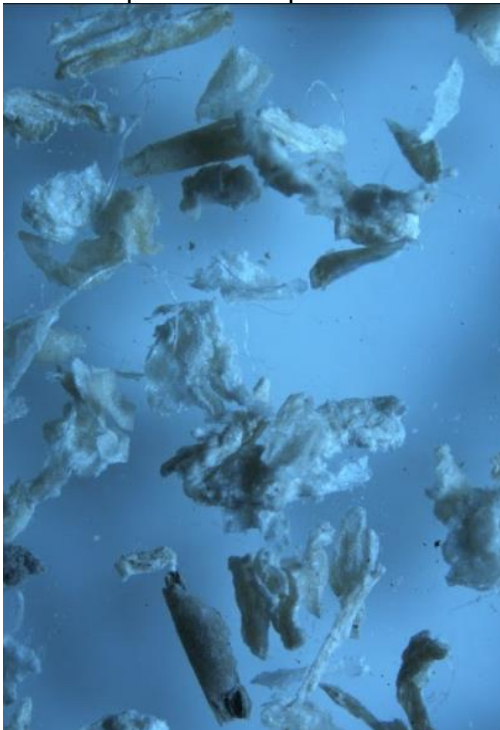


Figura 16. Bagazo de fique observado con estereoscopio retenido por los fondos

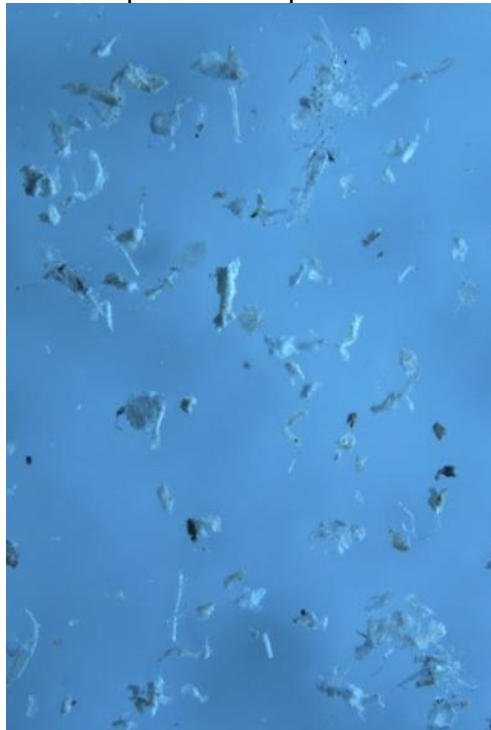


Figura 17. Fibra de coco observada con estereoscopio retenida por la malla #16



Figura 18. Fibra de coco observada con estereoscopio retenida por la malla #50



Figura 19. Fibra de coco observada con estereoscopio retenida por la malla #30



Figura 20. Fibra de coco observada con estereoscopio retenida por los fondos



Figura 21. Bagazo de caña observado con estereoscopio retenido por la malla #16

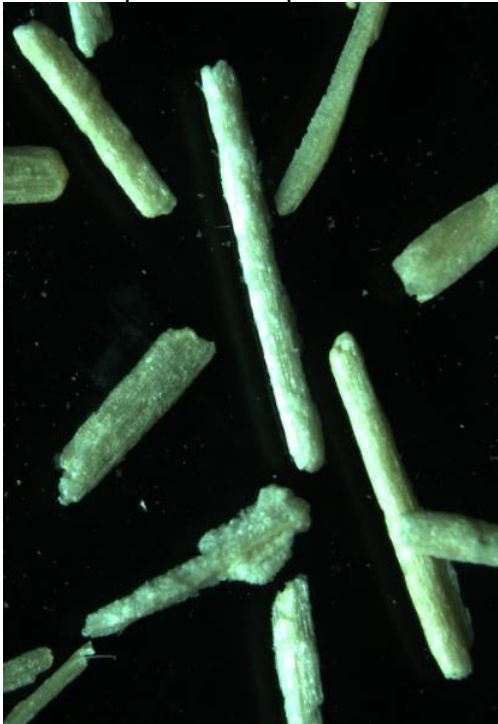


Figura 22. Bagazo de caña observado con estereoscopio retenido por la malla #50

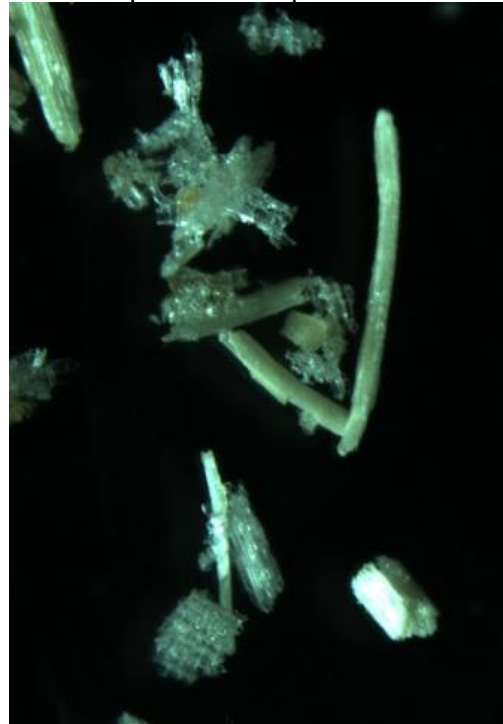


Figura 23. Bagazo de caña observado con estereoscopio retenido por la malla #30



Figura 24. Bagazo de caña observado con estereoscopio retenido por los fondos.

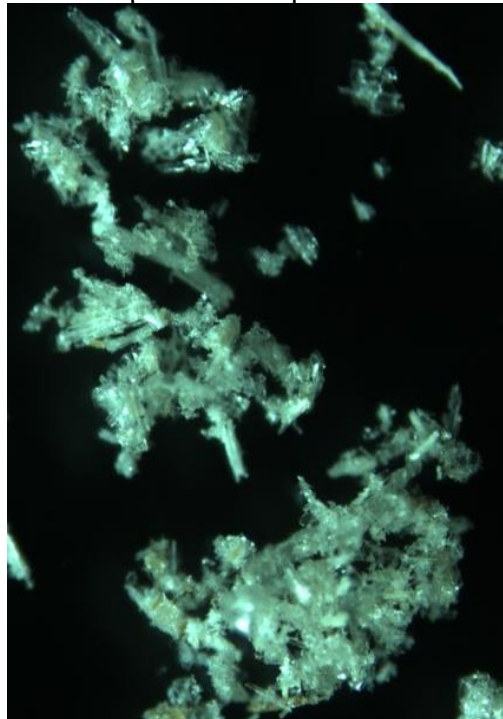




Figura 25. Análisis bromatológico del bagazo de fique.


 Universidad de Nariño FUNDADA EN 1964	<b>SECCIÓN DE LABORATORIOS REPORTE DE RESULTADOS</b>				Código: LBE-PRS-FR-76	
					Página: 1 de 1	
					Versión: 2	
					Vigente a partir de: 2014-01-15	
<b>LABORATORIO</b>		<b>BROMATOLOGÍA - ABONOS ORGÁNICOS</b>				
<b>DATOS USUARIO</b>		<b>DATOS MUESTRA</b>		<b>REPORTE No. LB-R- 018B-19 parcial</b>		
Solicitante: Universidad del Cauca. Atn: Elsa Susana Cajiao Buitrón, Investigadora Grupo de Investigación CYTBIA (Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial)		Muestra: Fibra de fique		Código muestra: 321		
Dirección: Facultad de Ciencias Agrarias, Vereda las Guacas, Vía al Penal San Isidro.		Procedencia: Cultivos de la Asociación de fiqueros de Jambaló, Cauca				
cc / nit: 891500319-2		Responsable del Muestreo <sup>a</sup>				
Teléfono: 316 4054945 (Susana Cajiao)		Fecha de Muestreo <sup>a</sup>		AA 19	MM 04	DD 28
e-mail: ecajiao@unicauca.edu.co;		Fecha Recepción Muestra en Laboratorio		AA 19	MM 05	DD 30
jersonluna@unicauca.edu.co		Fecha de Emisión del Reporte		AA 19	MM 07	DD 17
<b>FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO</b>		2019-03-14 a 2019-07-16				
<b>ANÁLISIS SOLICITADO</b>		Proximal, Energía, FDN, FDA, Lignina, Minerales				
PARÁMETRO	MÉTODO	TÉCNICA	UNIDAD DE MEDIDA	Base Parcialm. Seca	Base Seca	
Humedad	Secado estufa	Gravimétrica	g/100g	9,36		
Materia seca	Secado estufa	Gravimétrica	g/100g	90,64		
Ceniza	Incineración mufla	Gravimétrica	g/100g	6,09	6,72	
Extracto etéreo	Extracción Soxhlet	Gravimétrica	g/100g	2,78	3,07	
Fibra cruda	Digestión ácida-básica. Bolsas Ankom	Gravimétrica	g/100g	38,21	42,16	
Proteína	Kjeldahl (N*6,25)	Titulométrica	g/100g	5,28	5,82	
Extracto No Nitrogenado	Cálculo matemático	Cálculo matemático	g/100g	38,28	42,24	
Energía	Bomba calorimétrica	Calorimétrica	Kcal/100g	389	429	
Fibra Detergente Neutro	Van Soest Secuencial. Bolsas Ankom	Gravimétrica	g/100g	47,91	52,86	
Fibra Detergente Ácido	Van Soest Secuencial. Bolsas Ankom	Gravimétrica	g/100g	41,11	45,36	
Lignina	Van Soest Secuencial. Oxidación KMnO <sub>4</sub>	Gravimétrica	g/100g	5,37	5,93	
Celulosa	Van Soest Secuencial.	Gravimétrica	g/100g	35,05	38,67	
Hemicelulosa	Van Soest Secuencial.	Gravimétrica	g/100g	6,80	7,50	
Calcio	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	g/100g			
Fósforo	Oxidación húmeda, Colorimetría	Colorimétrica	g/100g	0,06	0,06	
Magnesio	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	g/100g			
Potasio	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	g/100g			
Azufre	Oxidación húmeda, Turbidimetría	Turbidimétrica	g/100g	0,04	0,05	
Hierro	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	mg/Kg			
Manganeso	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	mg/Kg			
Zinc	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	mg/Kg			
Cobre	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	mg/Kg			
<b>OBSERVACIONES</b>						
<b>Nota a</b>		Información suministrada por el usuario				
<b>Expresión de resultados</b>		Con base a muestra seca				
<b>RESULTADOS VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA</b>						
UNA VEZ ENTREGADO ESTE INFORME DE RESULTADOS, EL LABORATORIO DEJA DE TENER CONTROL SOBRE SU REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL.						

Figura 26. Análisis bromatológico de la fibra de coco.


 Universidad de Nariño FUNDADA EN 1964	<b>SECCIÓN DE LABORATORIOS</b>				Código: LBE-PRS-FR-76	
	<b>REPORTE DE RESULTADOS</b>				Página: 1 de 1	
					Versión: 2	
					Vigente a partir de: 2014-01-15	
<b>LABORATORIO</b>		<b>BROMATOLOGÍA - ABONOS ORGÁNICOS</b>				
<b>DATOS USUARIO</b>		<b>DATOS MUESTRA</b>		<b>REPORTE No. LB-R- 018A-19 parcial</b>		
Solicitante: Universidad del Cauca. Atn: Elsa Susana Cajiao Bultrón, Investigadora Grupo de Investigación CYTBIA (Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial)		Muestra: Fibra de coco		Código muestra: 320		
Dirección: Facultad de Ciencias Agrarias, Vereda las Guacas, Vía al Penal San Isidro.		Procedencia: Sustitutos ecológicos, Medellín				
cc / nit: 891500319-2		Responsable del Muestreo <sup>a</sup>		Jerson Alejandro Luna Córdoba, Angie Marcela Muñoz		
Teléfono: 316 4054945 (Susana Cajiao)		Fecha de Muestreo <sup>a</sup>		AA 19	MM 05	DD 09
e-mail: ecajiao@unicauca.edu.co;		Fecha Recepción Muestra en Laboratorio		AA 19	MM 05	DD 30
jersonluna@unicauca.edu.co		Fecha de Emisión del Reporte		AA 19	MM 07	DD 17
<b>FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO</b>		2019-03-14 a 2019-07-16				
<b>ANÁLISIS SOLICITADO</b>		Proximal, Energía, FDN, FDA, Lignina, Minerales				
PARÁMETRO	MÉTODO	TÉCNICA	UNIDAD DE MEDIDA	Base Parcialm. Seca	Base Seca	
Humedad	Secado estufa	Gravimétrica	g/100g	6,03		
Materia seca	Secado estufa	Gravimétrica	g/100g	93,97		
Ceniza	Incineración mufla	Gravimétrica	g/100g	2,89	3,08	
Extracto etéreo	Extracción Soxhlet	Gravimétrica	g/100g	0,14	0,15	
Fibra cruda	Digestión ácida-básica. Bolsas Ankom	Gravimétrica	g/100g	71,59	76,18	
Proteína	Kjeldahl (N*6,25)	Titulométrica	g/100g	1,08	1,15	
Extracto No Nitrogenado	Cálculo matemático	Cálculo matemático	g/100g	18,27	19,44	
Energía	Bomba calorimétrica	Calorimétrica	Kcal/100g	434	462	
Fibra Detergente Neutro	Van Soest Secuencial. Bolsas Ankom	Gravimétrica	g/100g	85,33	90,80	
Fibra Detergente Ácido	Van Soest Secuencial. Bolsas Ankom	Gravimétrica	g/100g	75,48	80,32	
Lignina	Van Soest Secuencial. Oxidación KMnO <sub>4</sub>	Gravimétrica	g/100g	12,51	13,31	
Celulosa	Van Soest Secuencial.	Gravimétrica	g/100g	61,97	65,94	
Hemicelulosa	Van Soest Secuencial.	Gravimétrica	g/100g	9,85	10,48	
Calcio	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	g/100g			
Fósforo	Oxidación húmeda, Colorimetría	Colorimétrica	g/100g	0,04	0,05	
Magnesio	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	g/100g			
Potasio	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	g/100g			
Azufre	Oxidación húmeda, Turbidimetría	Turbidimétrica	g/100g	0,03	0,03	
Hierro	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	mg/Kg			
Manganeso	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	mg/Kg			
Zinc	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	mg/Kg			
Cobre	Oxidación húmeda, EAA	Espectroscopía A.A.	mg/Kg			
<b>OBSERVACIONES</b>						
<b>Nota a</b>		Información suministrada por el usuario				
<b>Expresión de resultados</b>		Con base a muestra seca				
<b>RESULTADOS VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA</b>						
UNA VEZ ENTREGADO ESTE INFORME DE RESULTADOS, EL LABORATORIO DEJA DE TENER CONTROL SOBRE SU REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL.						

Figura 27. Análisis bromatológico del bagazo de caña de azúcar



Laboratorio de servicios analíticos

**INFORME DE ENSAYOS**

**Solicitante:** Angie Marcela Muñoz

**Fecha de muestreo:** 2019-07-16

**Observaciones:** angimunoz@unicauca.edu.co 314-4256807

**Número serial:** T2019-38

**Fecha recepción de muestras:** 2019-07-17

**Numero de muestras:** 1

**Procedencia:** Popayan Cauca

**Entrega de resultados:** 2019-08-22

**Tipo de análisis:** Tejido Vegetal

**TABLA DE RESULTADOS**

#	Descripcion	Proteina (g/kg)	Humedad (g/kg)	MS (g/kg)	Cenizas (g/kg)	Ext.ET (g/kg)	FC (g/kg)	FAD (g/kg)	Lignina (g/kg)	Celulosa (g/kg)	FND (g/kg)	Hemicel. (g/kg)
1	Bagazo de Caña de Azucar	13.9	53.5	947	12.7	26.9	358	393	65.1	328	607	214

**Notas:**

1. Los resultados presentes en este informe, se refieren únicamente a las muestras ensayadas.
2. Este informe no debe ser alterado ni total ni parcialmente.
3. El laboratorio de servicios analíticos, no efectúa ningún tipo de muestreo de campo ya que el usuario es quien suministra las muestras.
4. Los valores iguales a cero corresponden a resultados que se encuentran por debajo de los límites de cuantificación del método.
5. LCM: Límite de Cuantificación del Método.

**Autoriza:**

**Orlando Idárraga Castaño**

Coordinador de Calidad - Laboratorio de Servicios Analíticos

E-mail: o.idarraga@cgiar.org

Tel. (57-2) 445 0000 Ext. 3803

Activ  
Ir a Co

**ANEXO B. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CRECIMIENTO DE *GANODERMA LUCIDUM* EN LOS TRES RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS.**

Figura 28. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de caña 1.

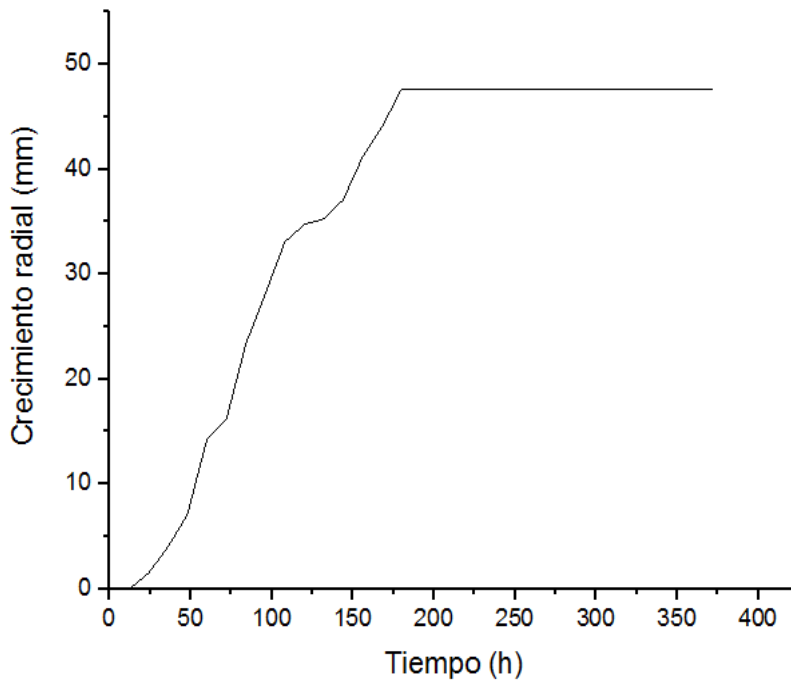


Figura 29. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de caña 2.

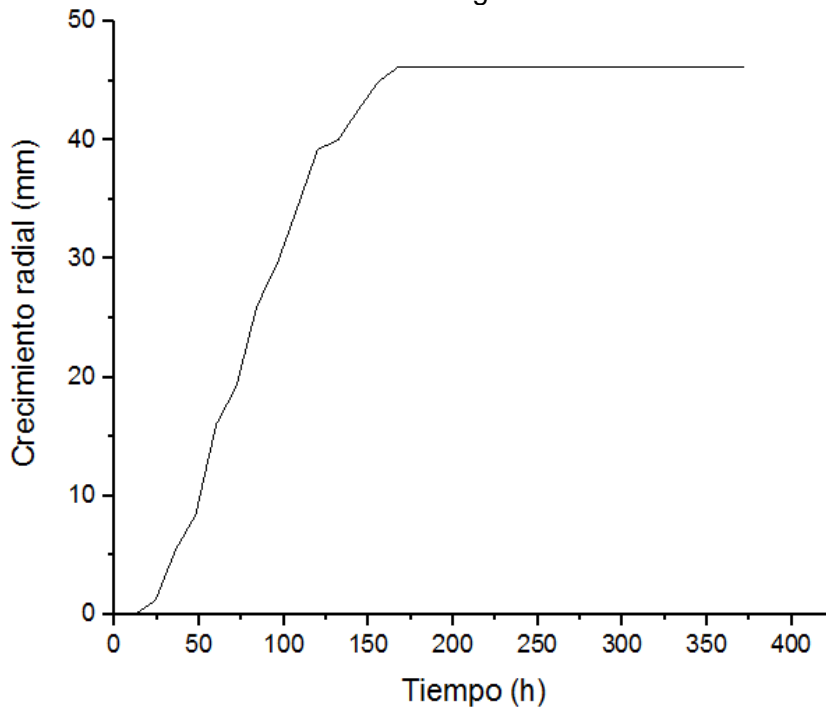


Figura 30. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de caña 3.

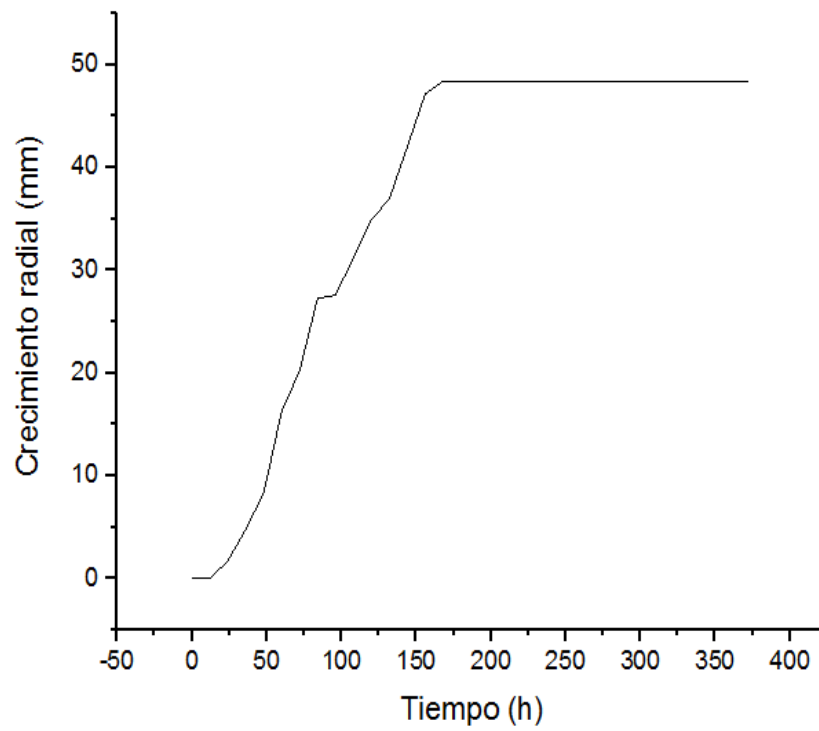


Figura 31. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de caña 4.

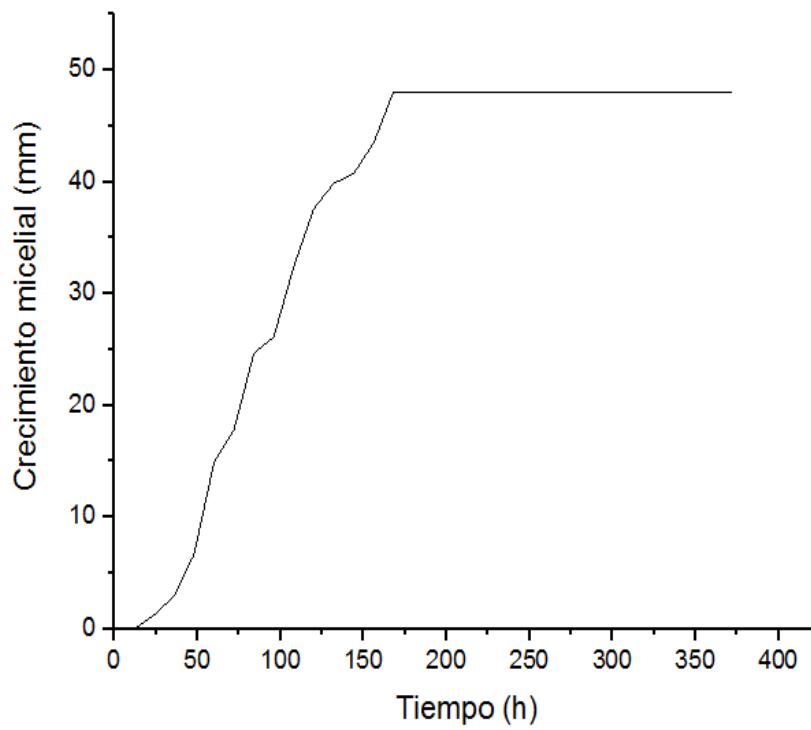




Figura 32. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de caña 5.

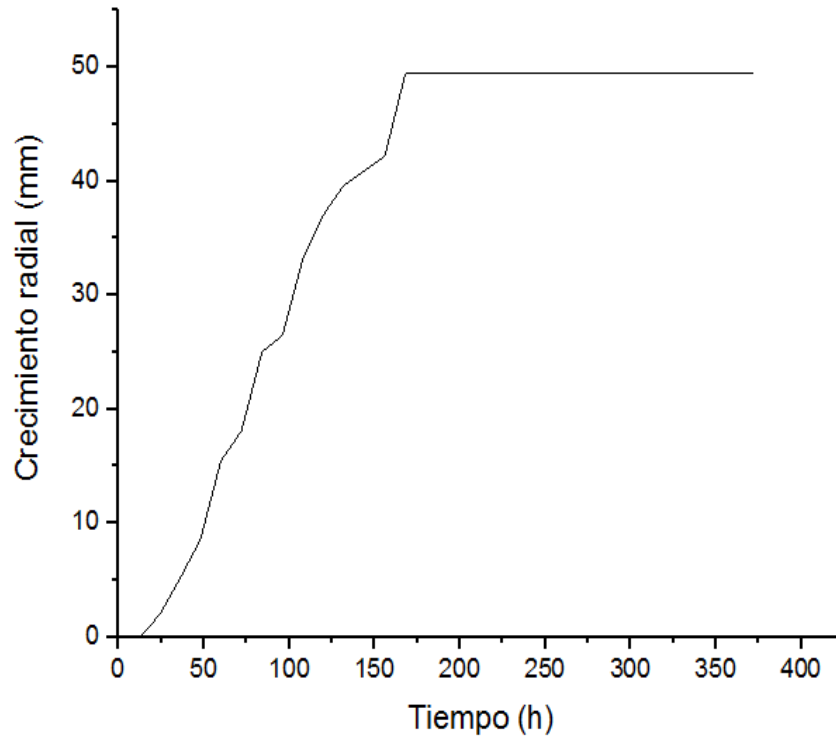


Figura 33. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de caña 6

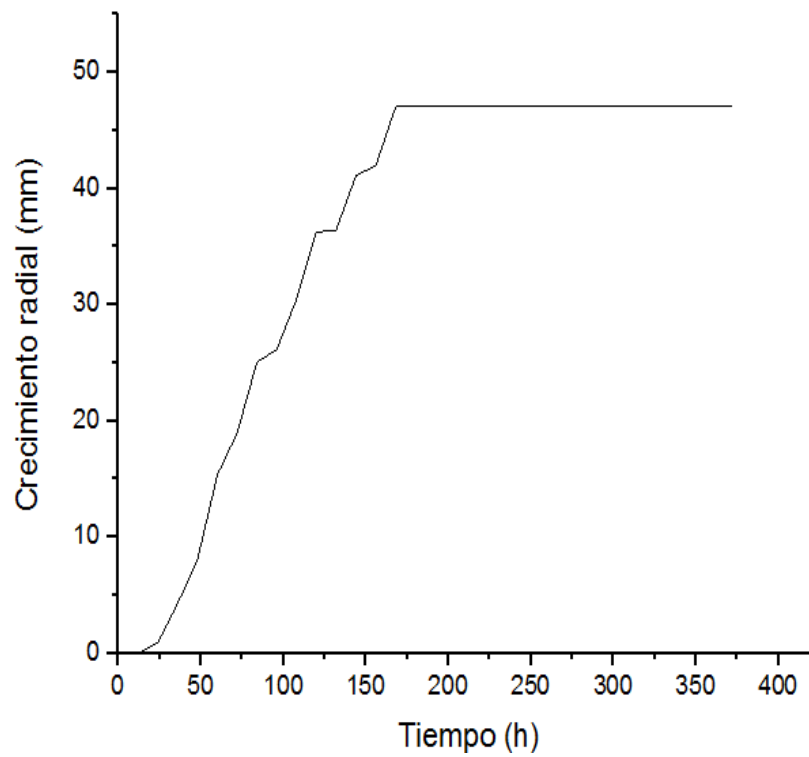


Figura 34. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de caña 7

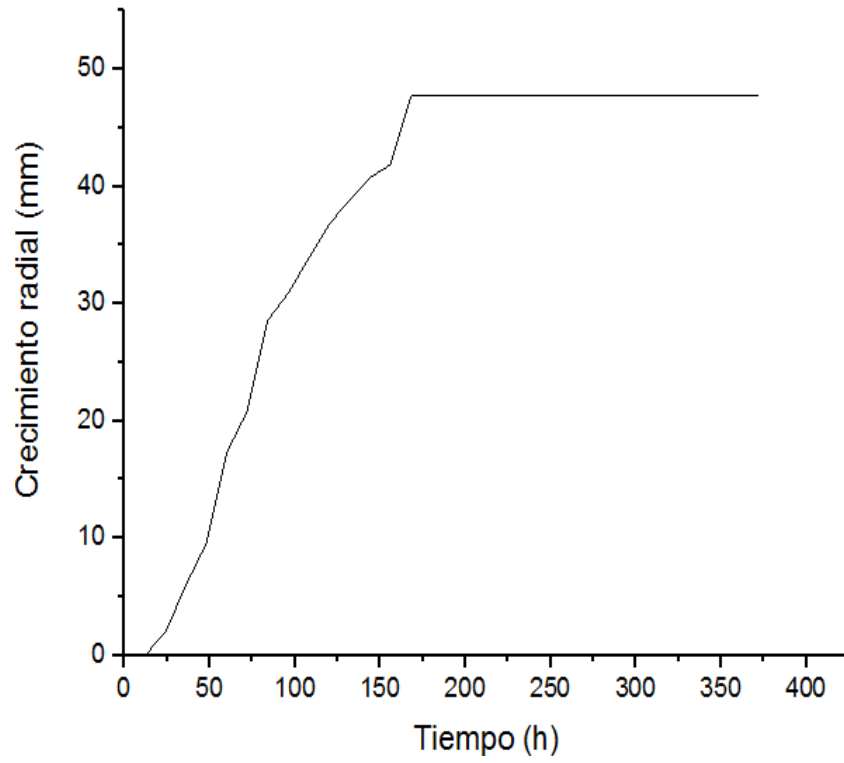


Figura 35. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de caña 8

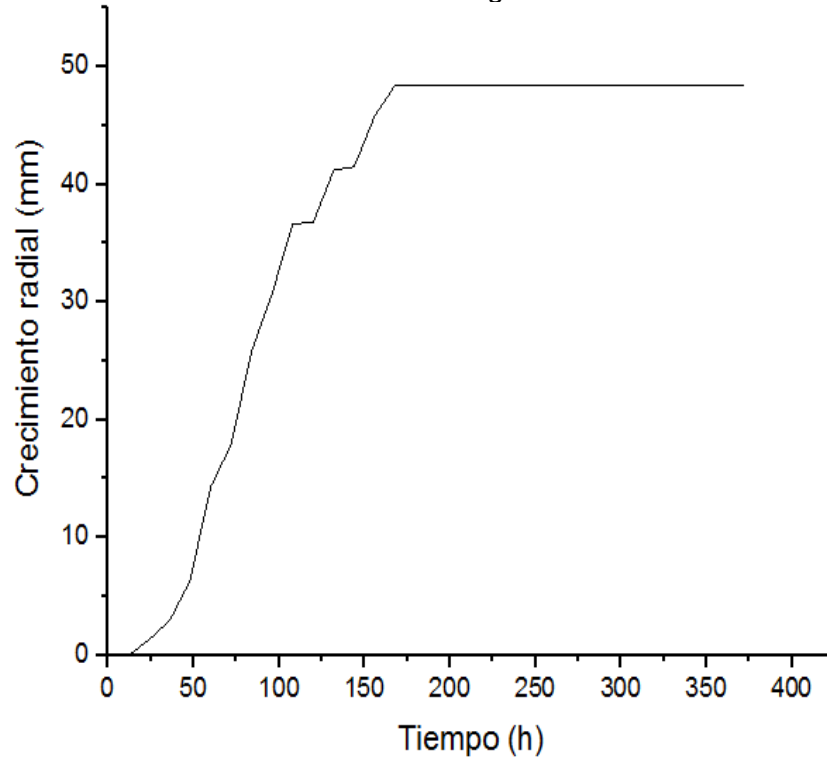


Figura 36. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de caña 9

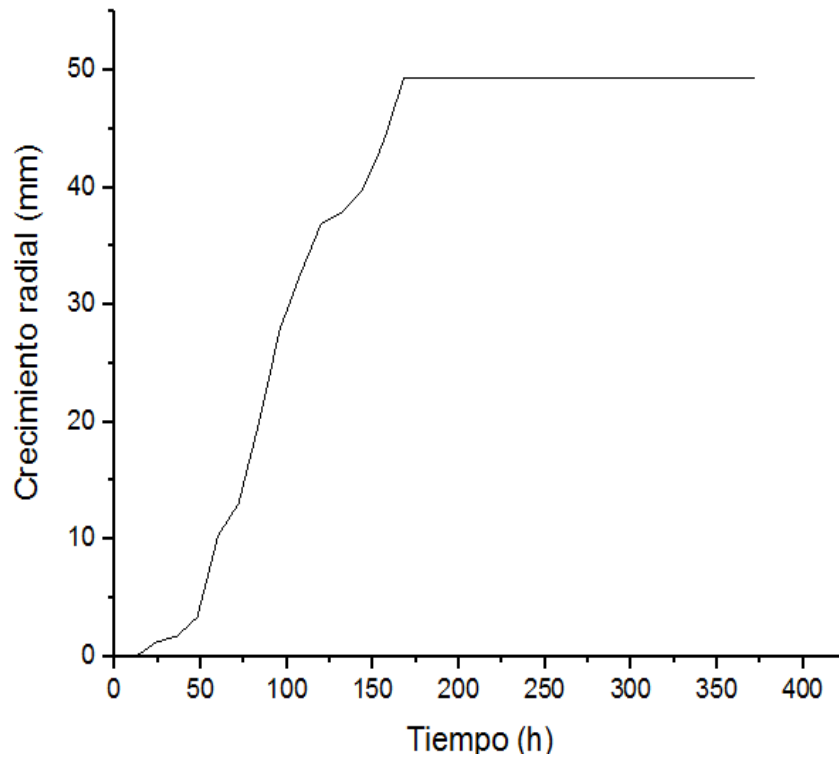


Figura 37. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de caña 10

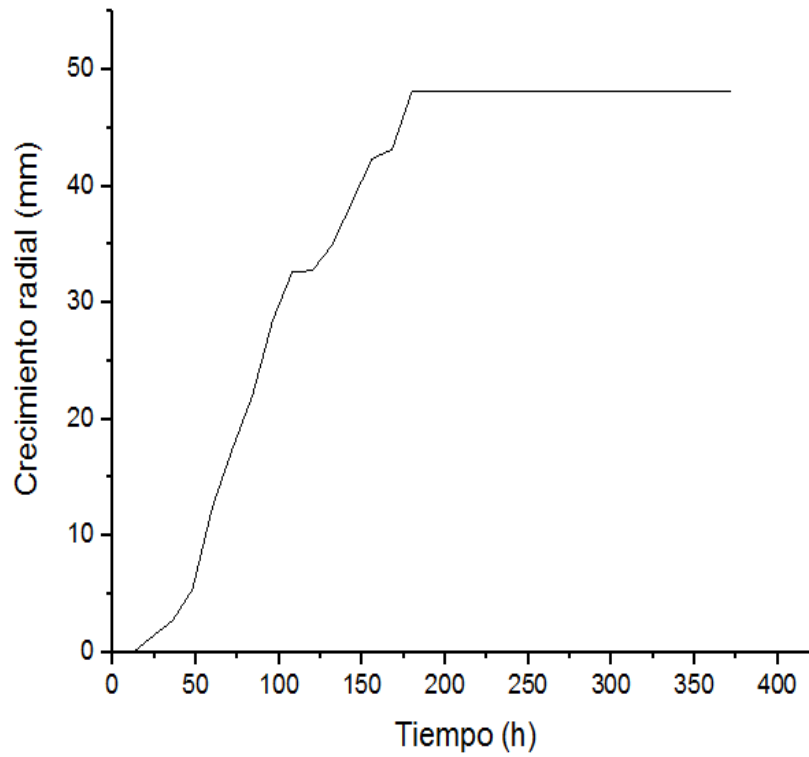


Figura 38. Crecimiento radial de *G. lucidum* en fibra de coco 1

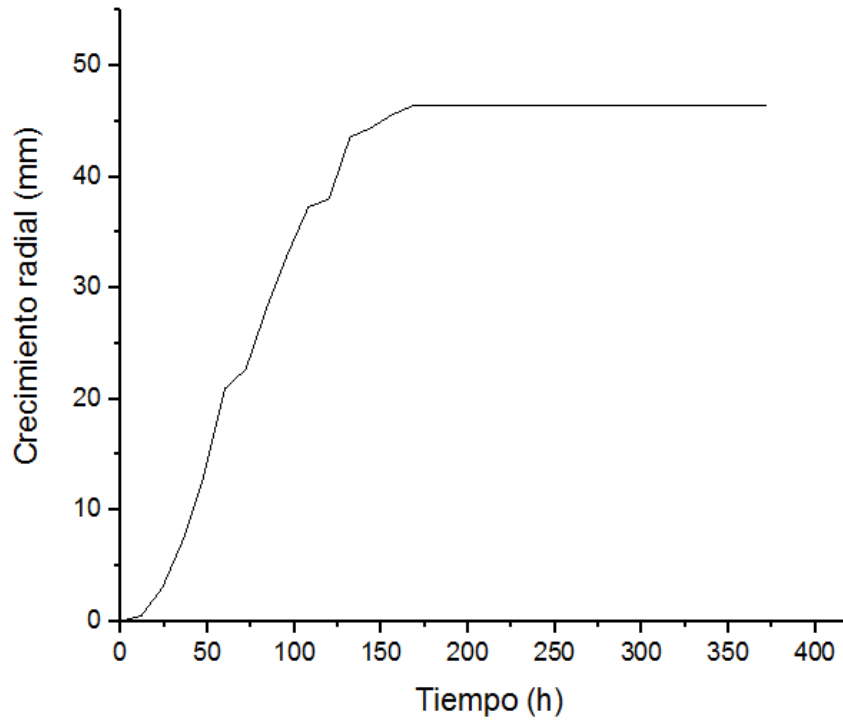


Figura 39. Crecimiento radial de *G. lucidum* en fibra de coco 2

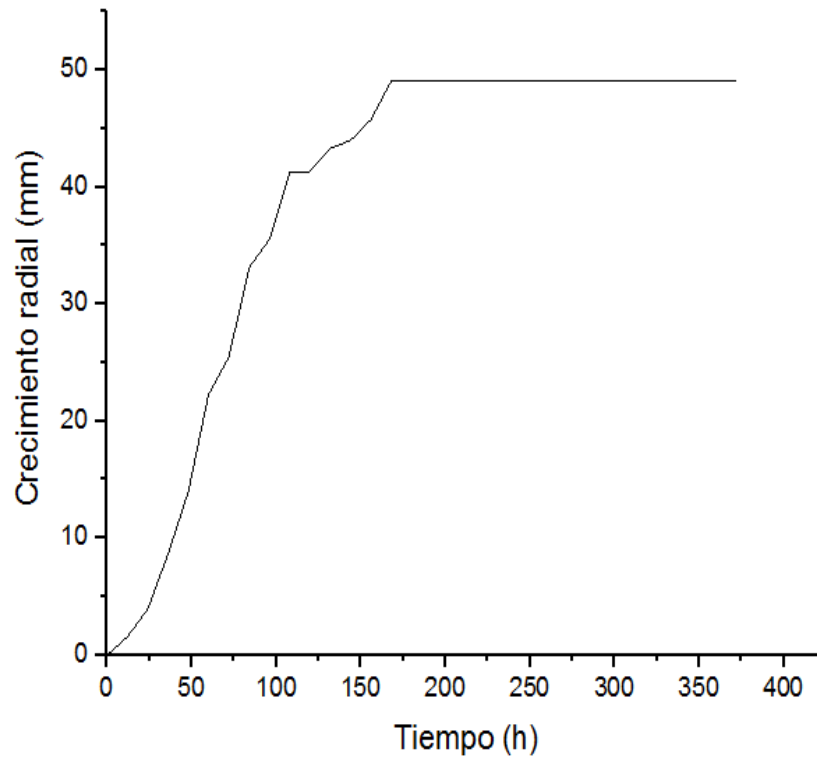


Figura 40. Crecimiento radial de *G. lucidum* en fibra de coco 3

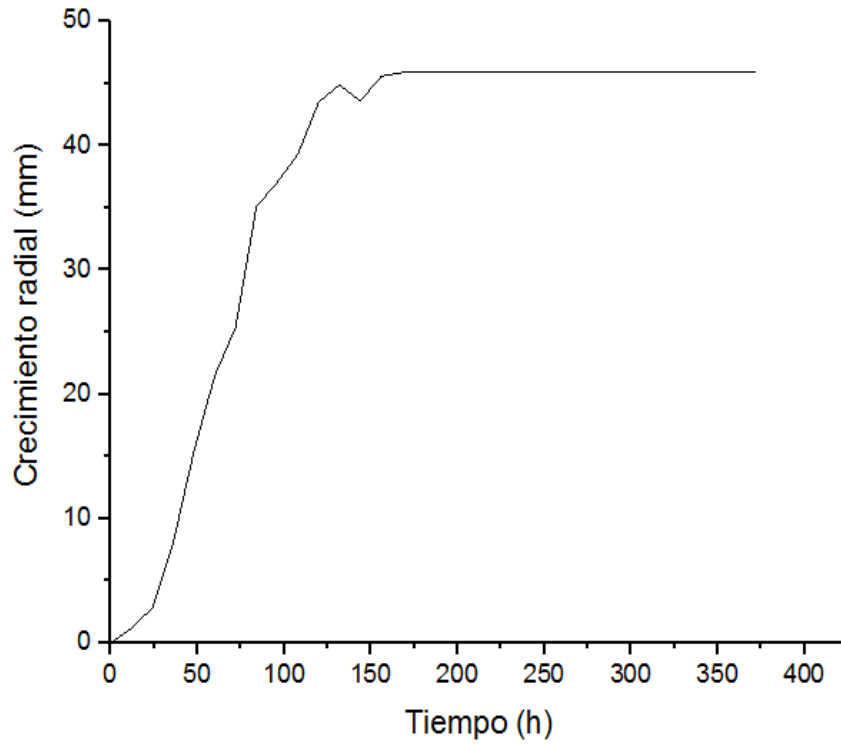


Figura 41. Crecimiento radial de *G. lucidum* en fibra de coco 4

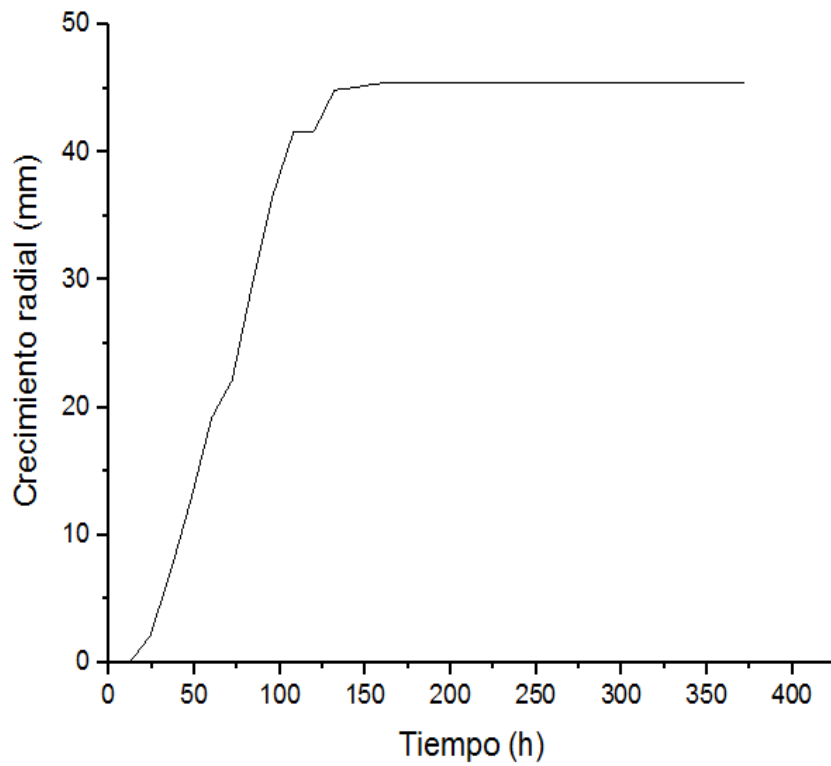


Figura 42. Crecimiento radial de *G. lucidum* en fibra de coco 5

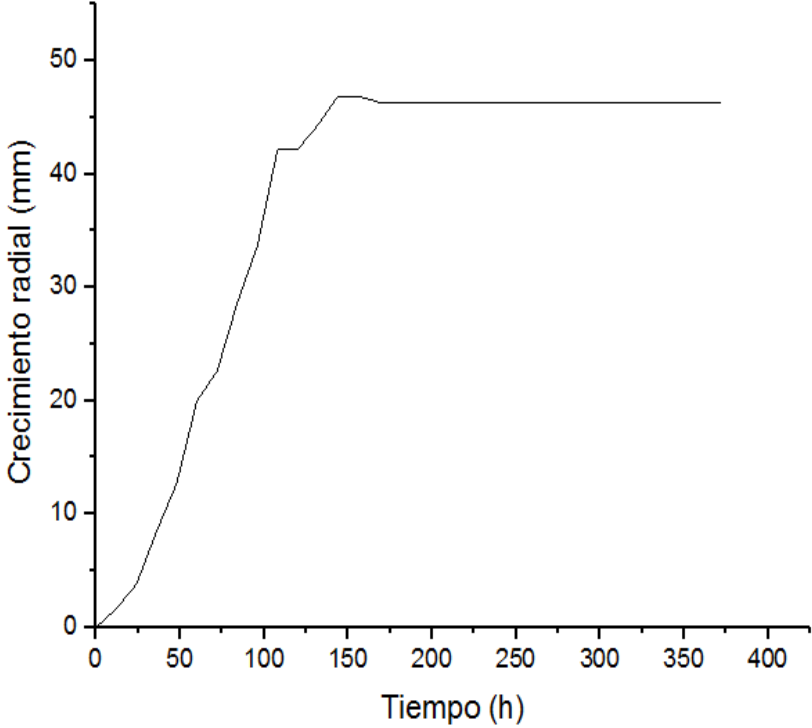


Figura 43. Crecimiento radial de *G. lucidum* en fibra de coco 6

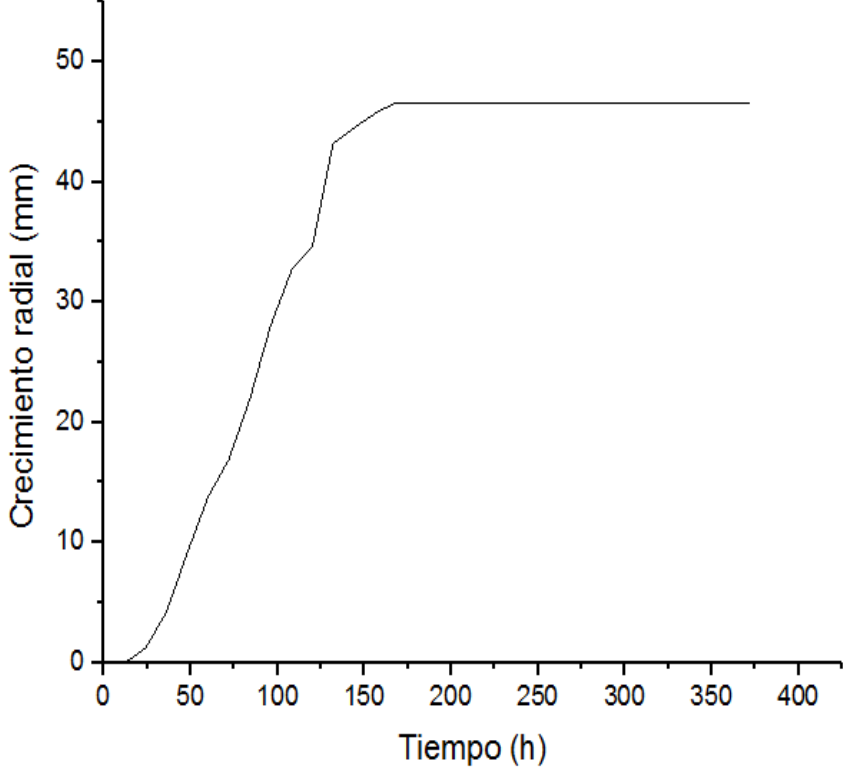


Figura 44. Crecimiento radial de *G. lucidum* en fibra de coco 7

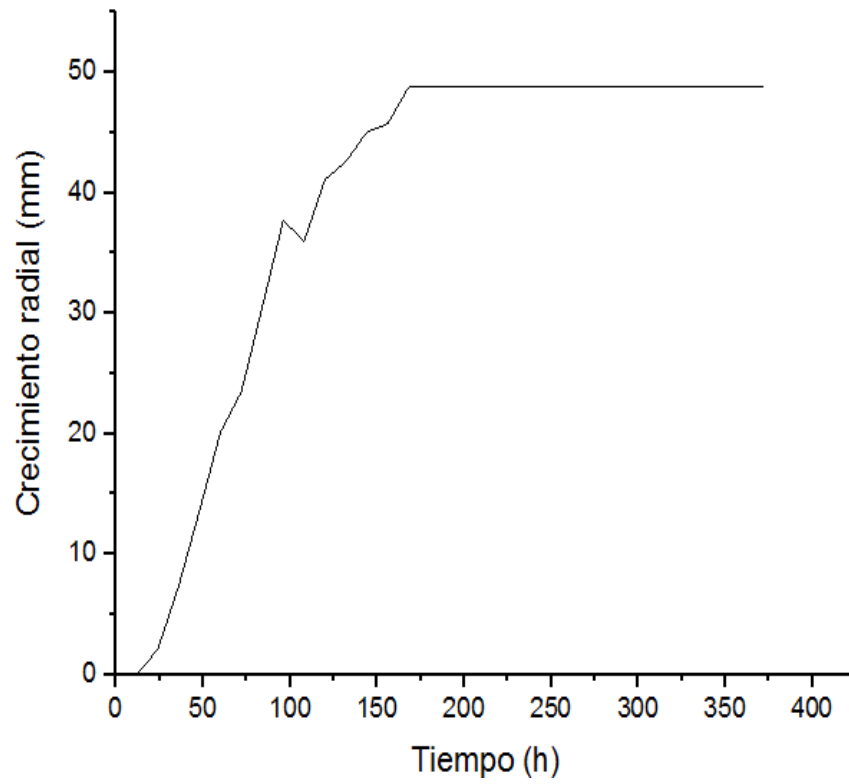


Figura 45. Crecimiento radial de *G. lucidum* en fibra de coco 8

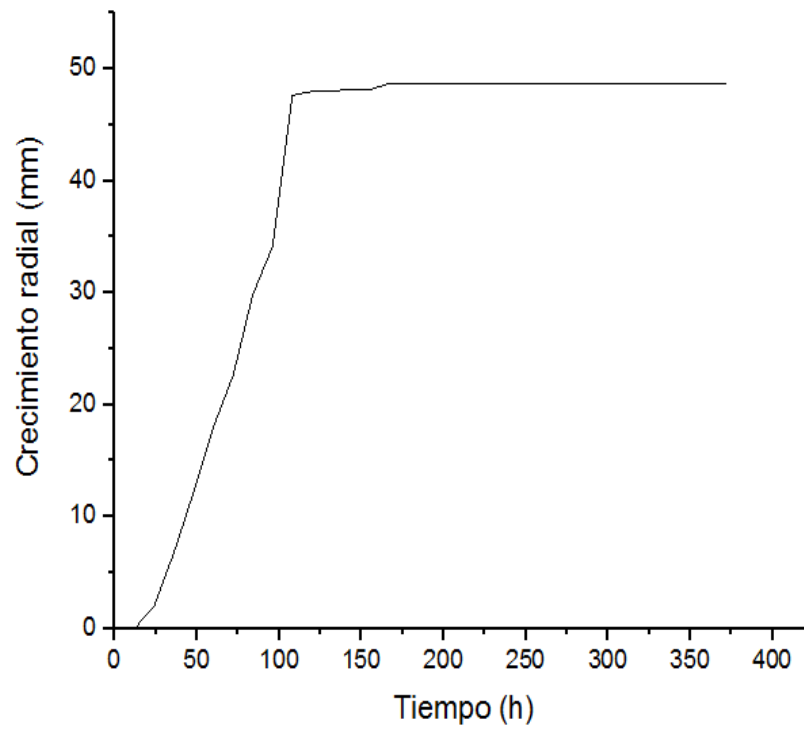


Figura 46. Crecimiento radial de *G. lucidum* en fibra de coco 9

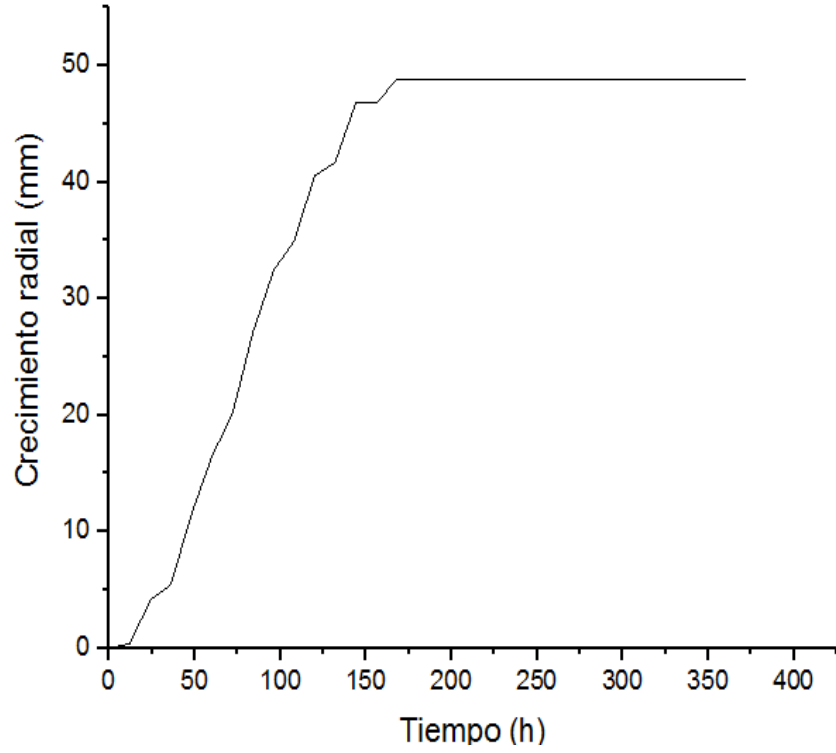


Figura 47. Crecimiento radial de *G. lucidum* en fibra de coco 10

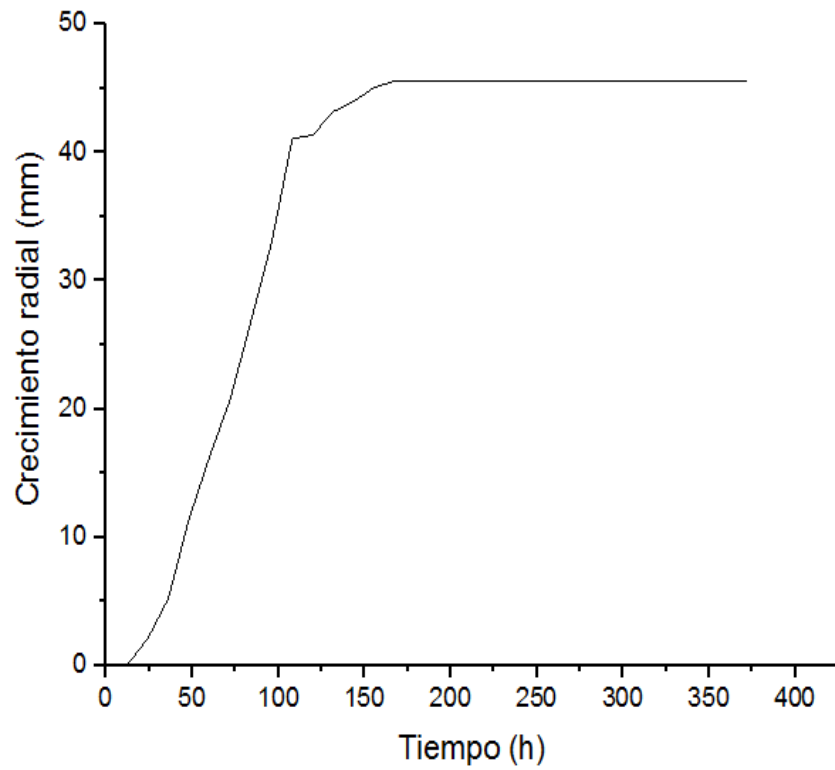




Figura 48. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de fique 1

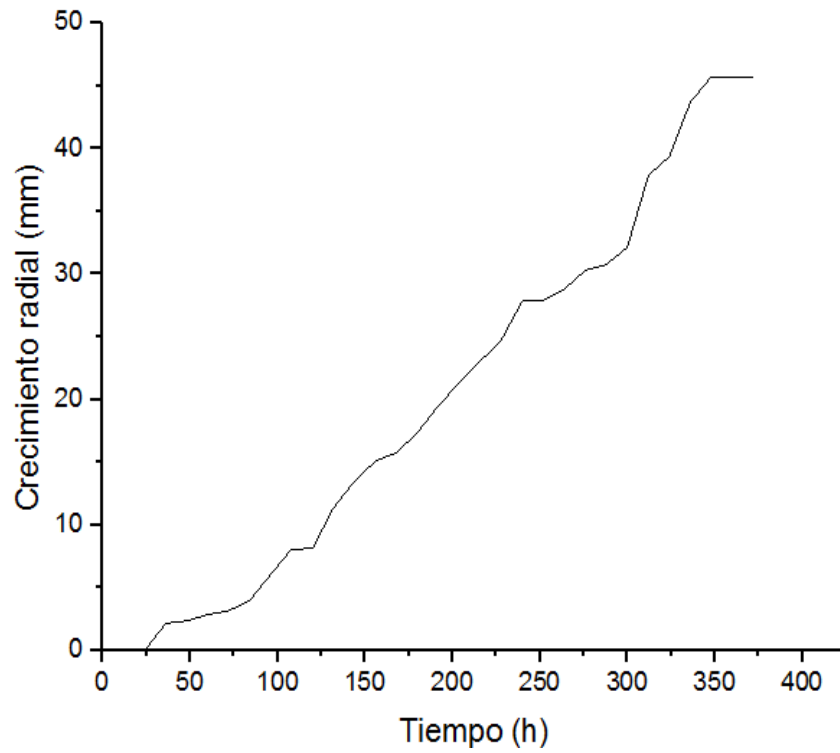


Figura 49. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de fique 2

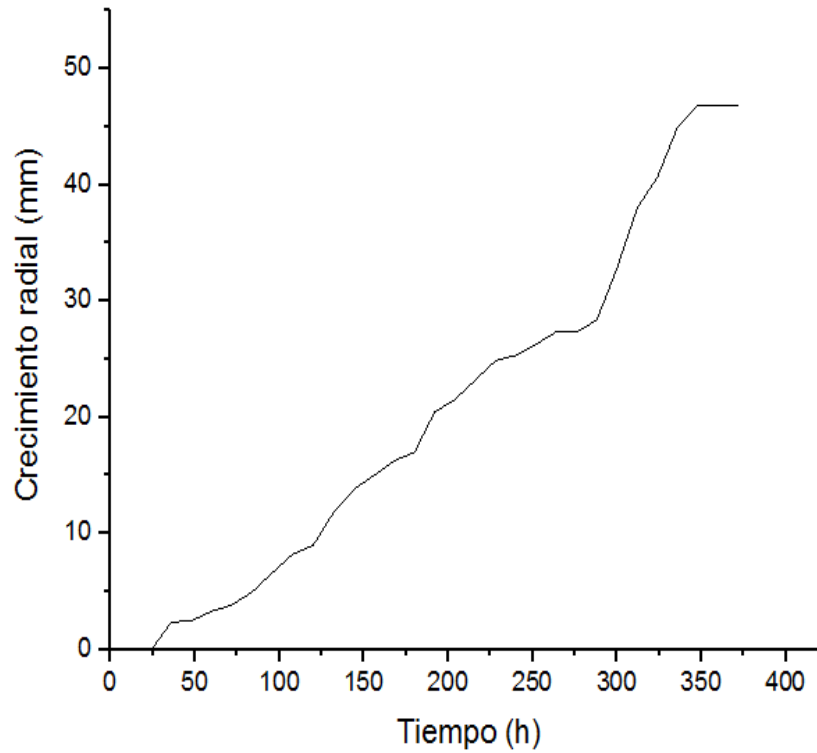


Figura 50. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de fique 3

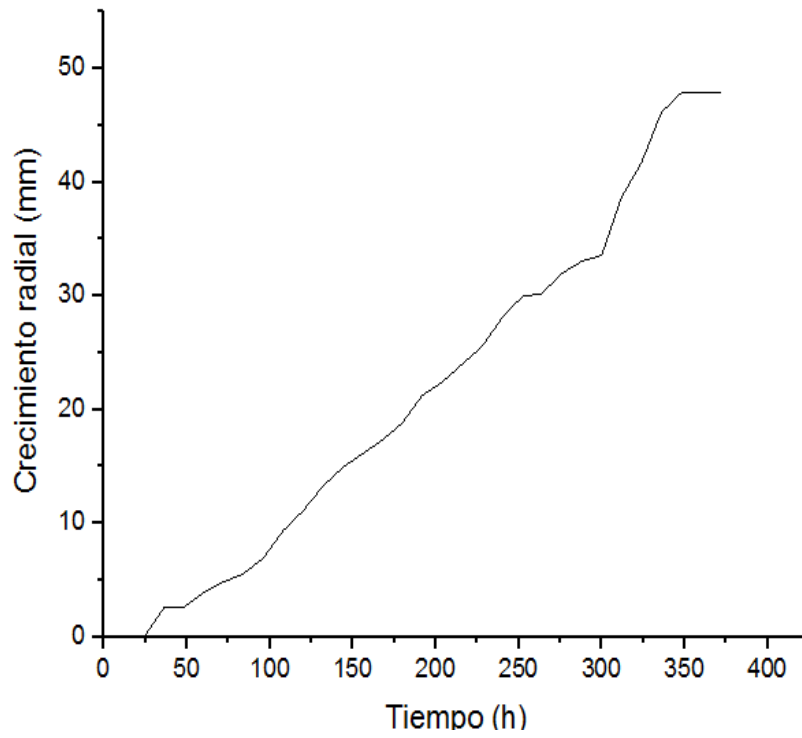


Figura 51. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de fique 4

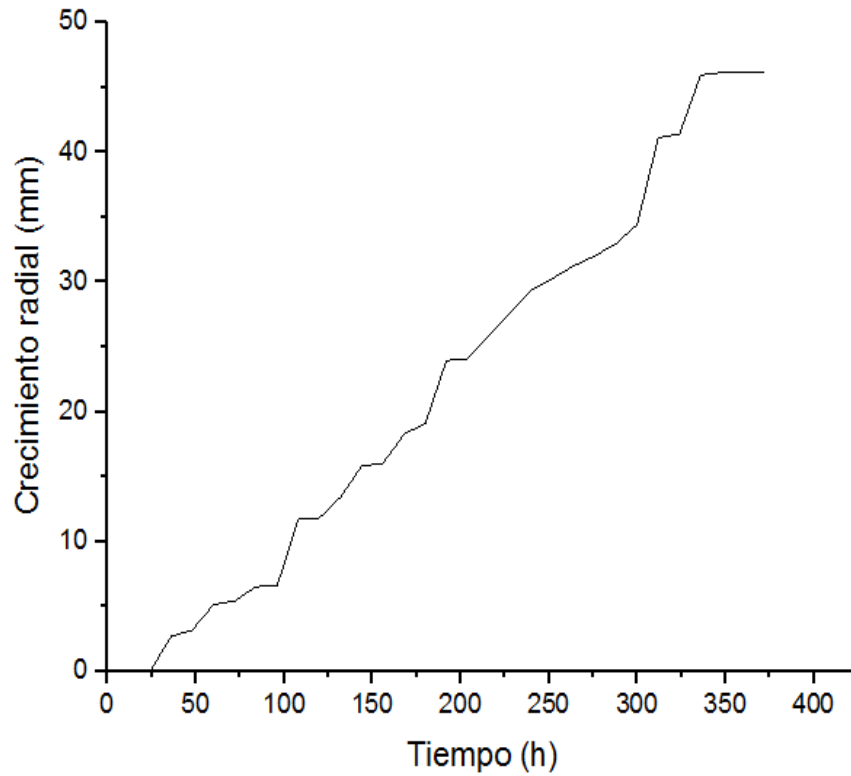


Figura 52. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de fique 5

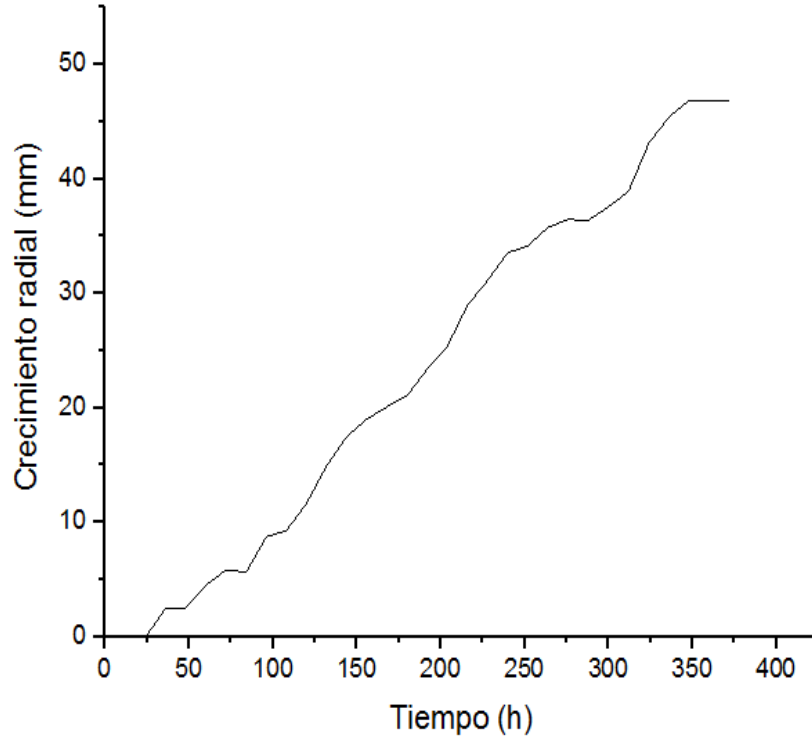


Figura 53. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de fique 6

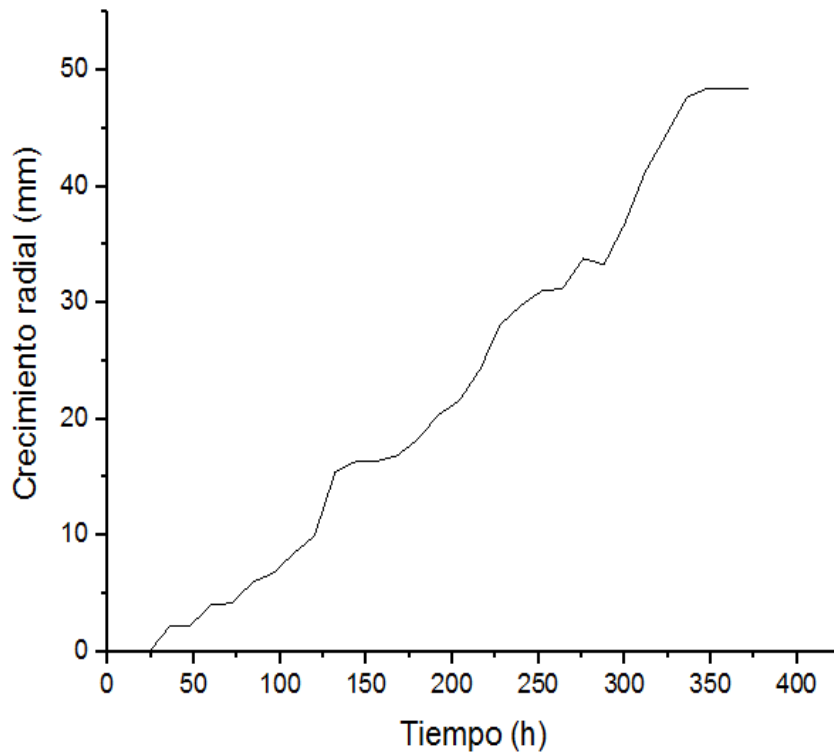


Figura 54. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de fique 7

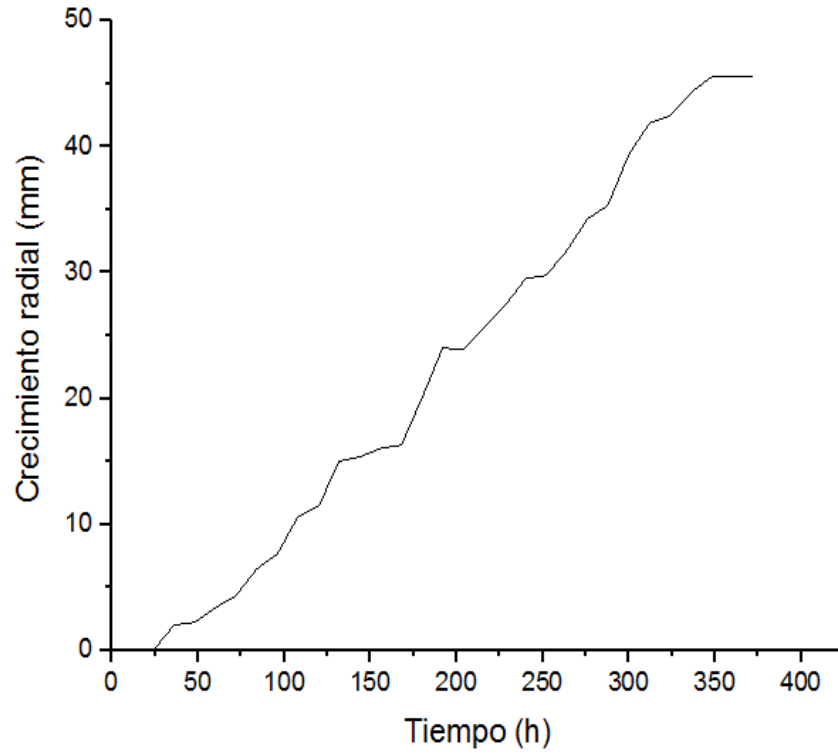


Figura 55. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de fique 8

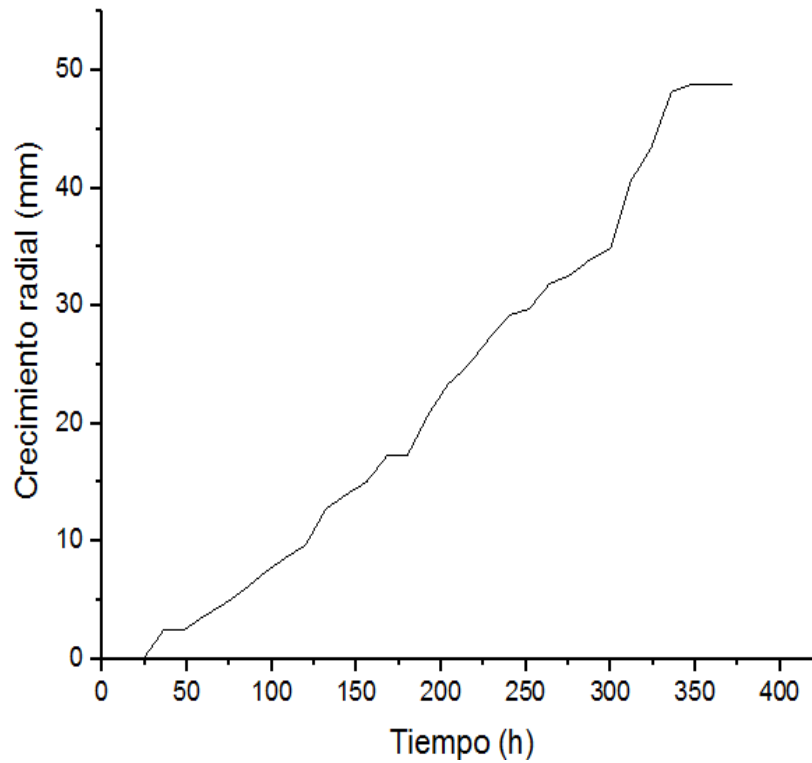


Figura 56. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de fique 9

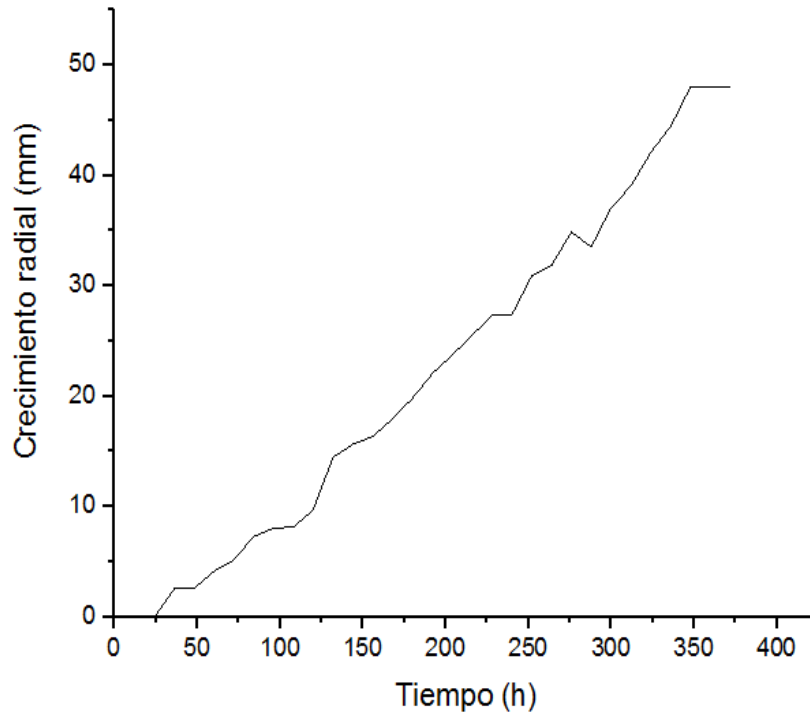
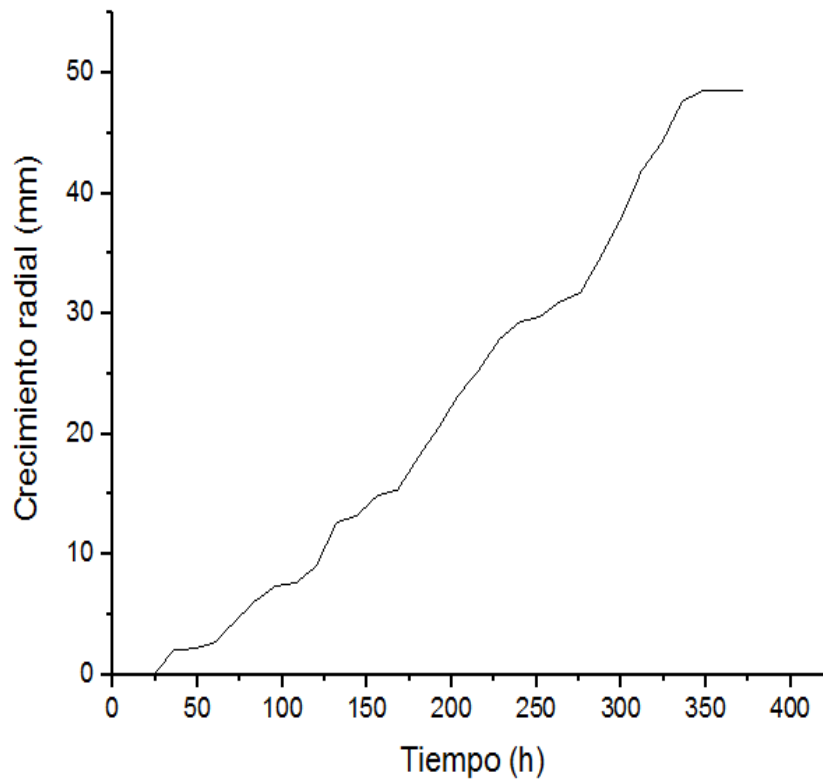


Figura 57. Crecimiento radial de *G. lucidum* en bagazo de fique 10



Cuadro 1. Prueba de normalidad

<b>Pruebas de normalidad</b>				
Variable de respuesta		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Velocidad de crecimiento radial	Coco	0,681	10	0,061
	Fique	0,927	10	0,419
	Caña	0,957	10	0,749

Cuadro 2. Pruebas de homogeneidad de varianzas

<b>Pruebas de homogeneidad de varianzas</b>					
		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Velocidad de crecimiento radial	Se basa en la media	4,462	2	27	0,085
	Se basa en la mediana	2,522	2	27	0,099
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	2,522	2	9,671	0,131
	Se basa en la media recortada	3,686	2	27	0,038

Cuadro 3 Prueba de ANOVA

<b>ANOVA</b>					
Velocidad de crecimiento radial					
	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0,384	2	0,192	52,033	0,000
Dentro de grupos	0,100	27	0,004		
Total	0,484	29			

**ANEXO C. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL ELABORADO CON RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS MEDIANTE COLONIZACIÓN FÚNGICA.**

Figura 58. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T16) 1.

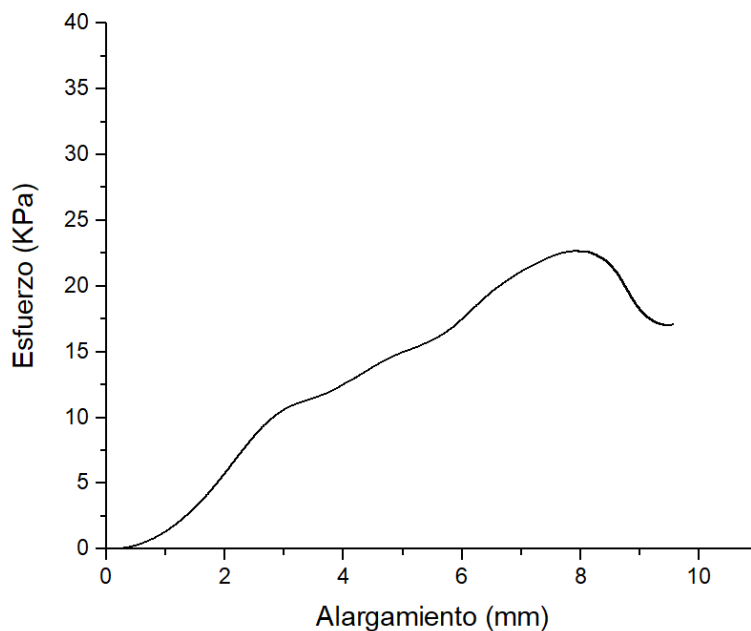


Figura 59. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T16) 2.

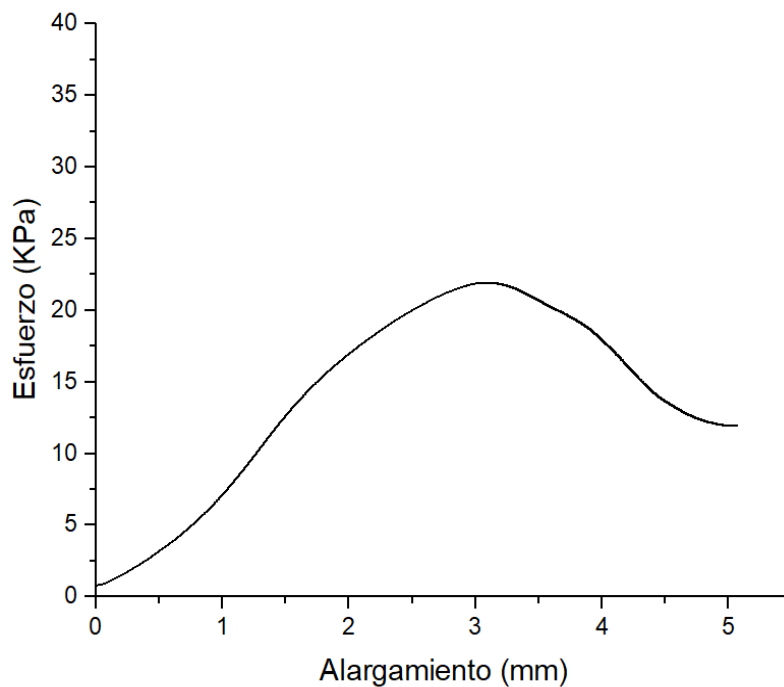


Figura 60. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T16) 3

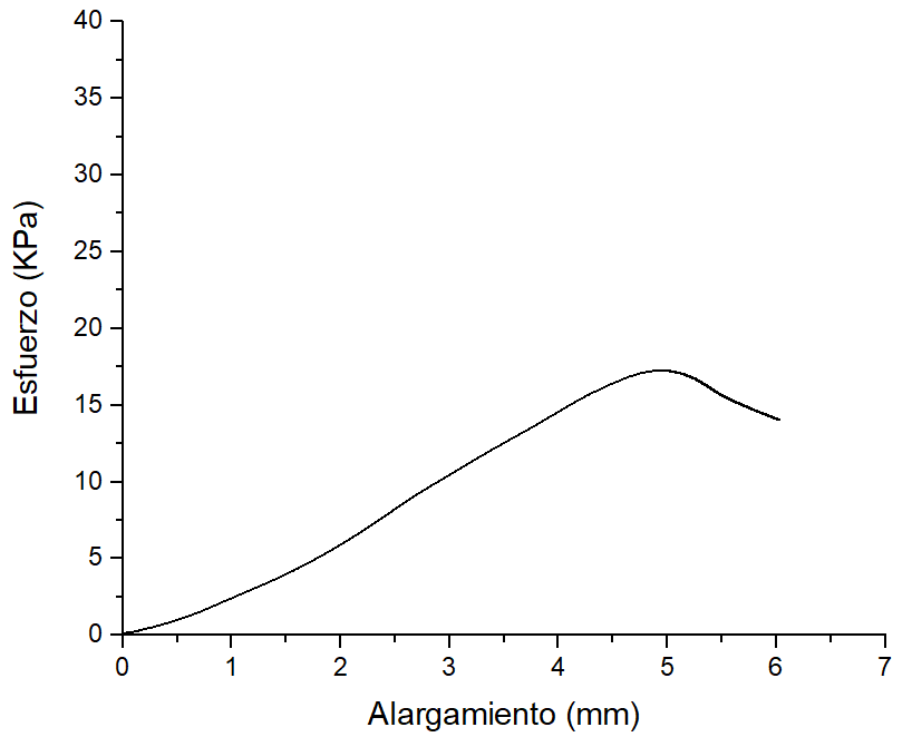


Figura 61. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T16) 4

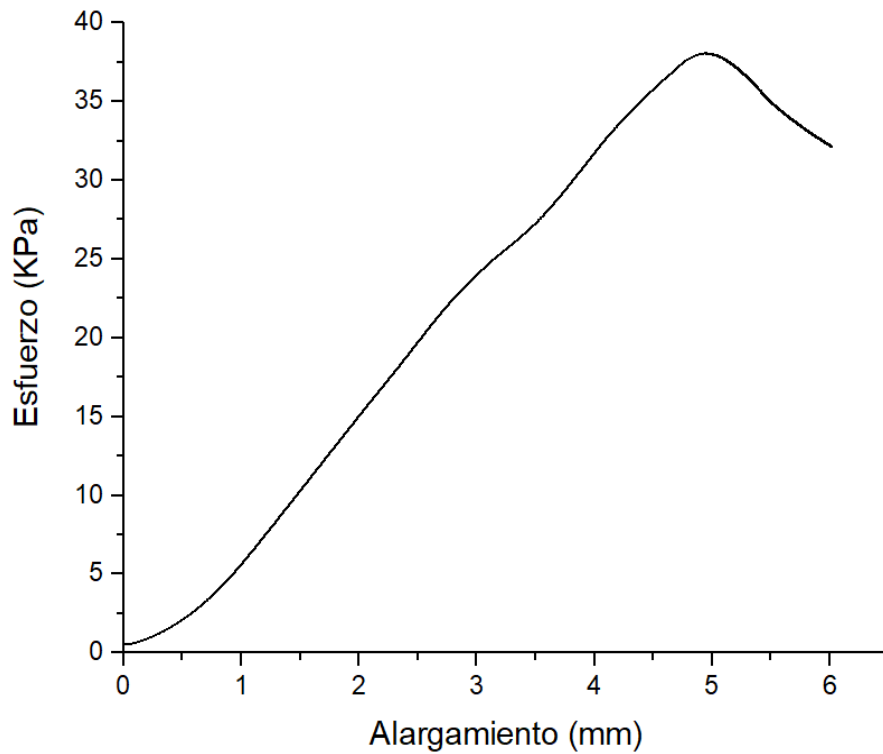




Figura 62. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T16) 5

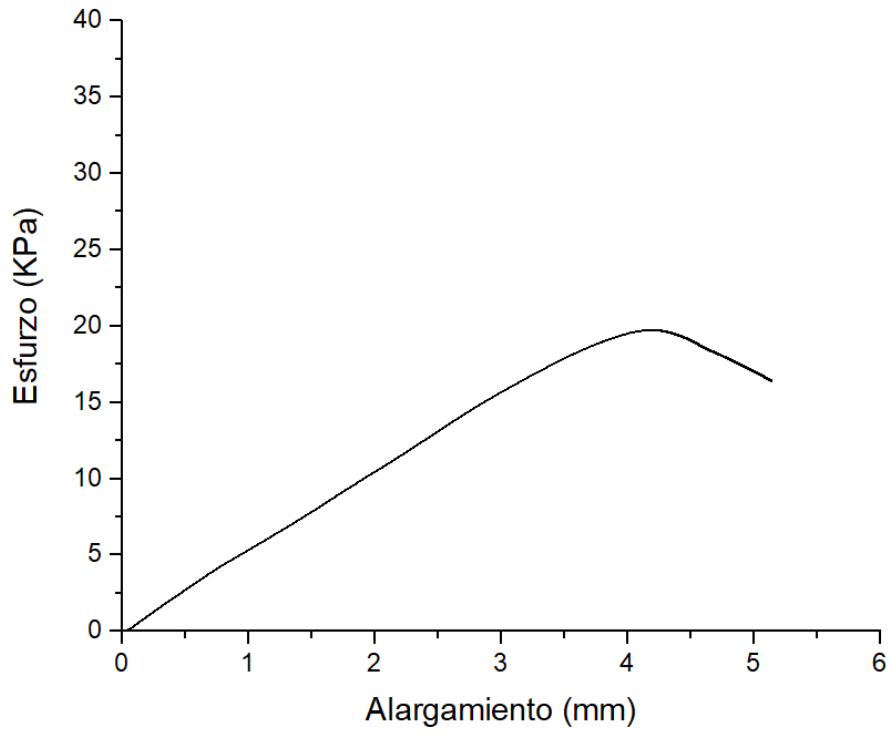


Figura 63. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T16) 6

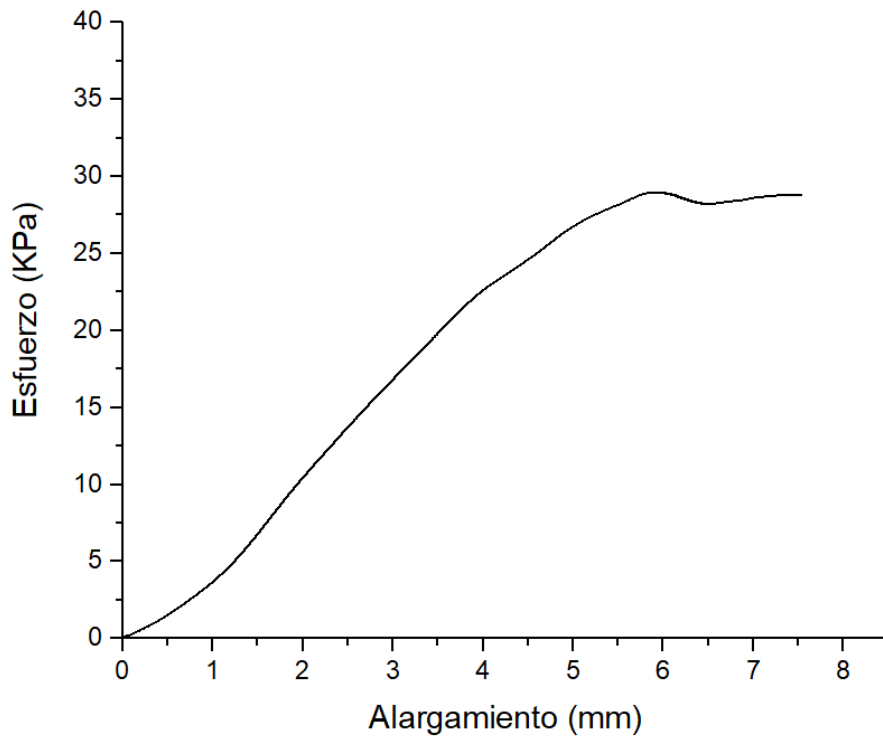


Figura 64. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T16) 7

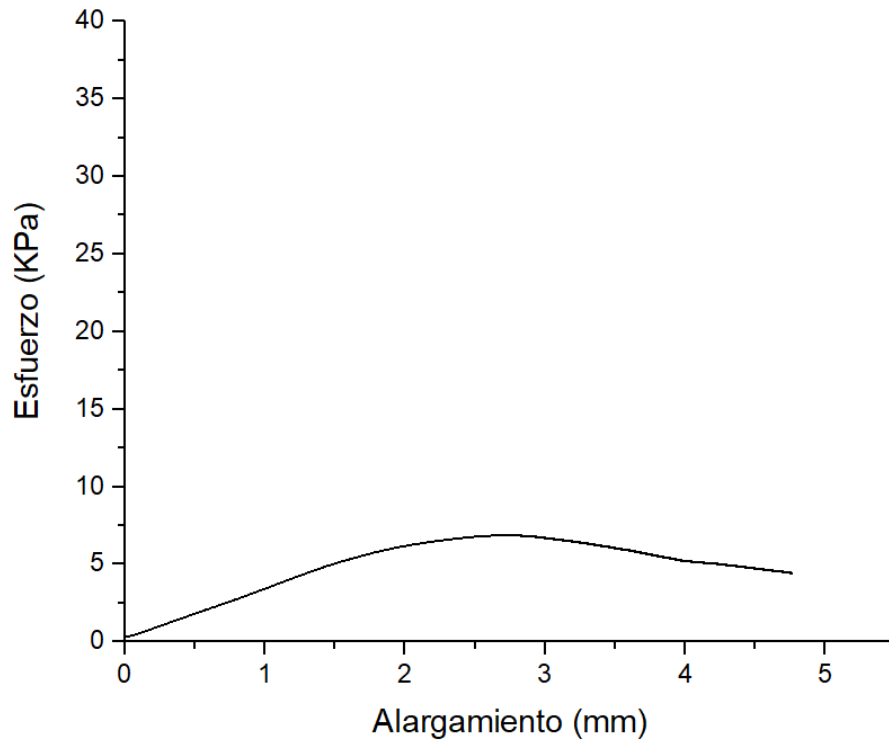


Figura 65. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T16) 8

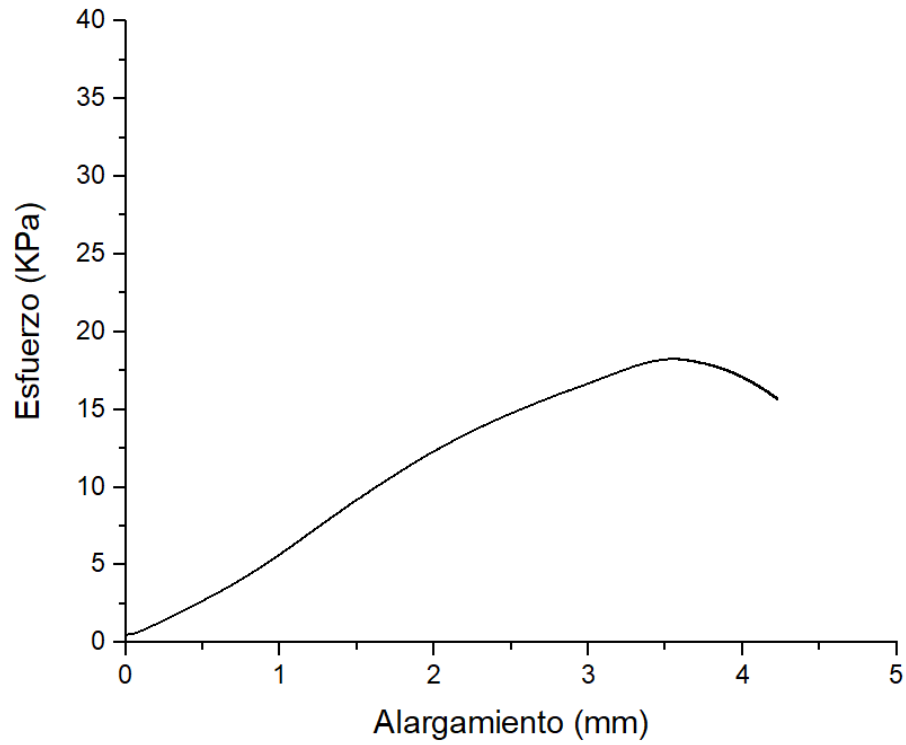


Figura 66. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T16) 9

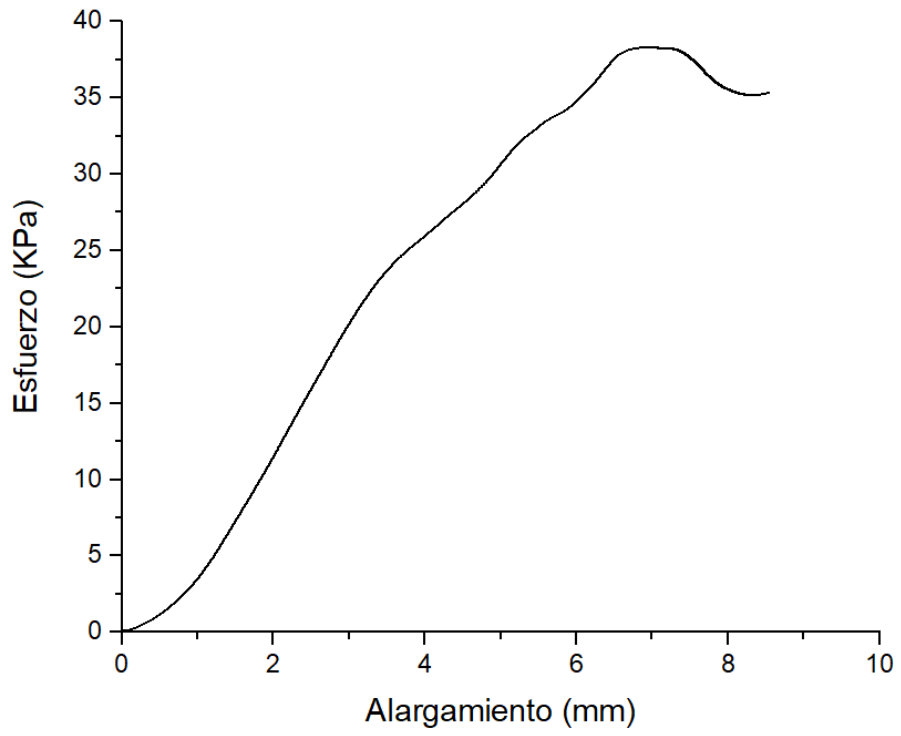


Figura 67. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T16) 10

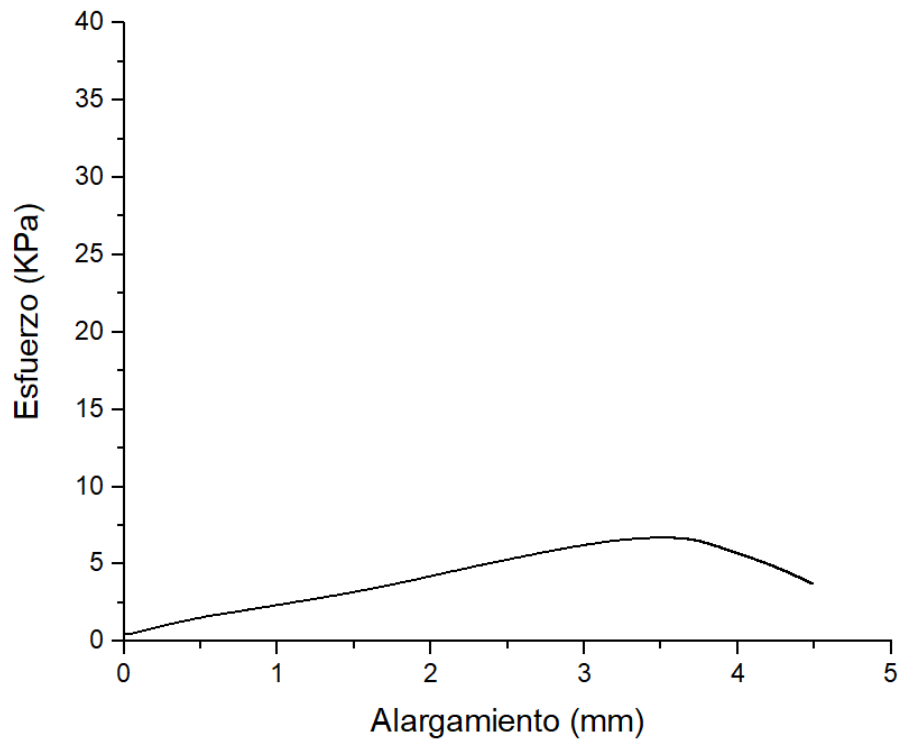


Figura 68. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T50) 1.

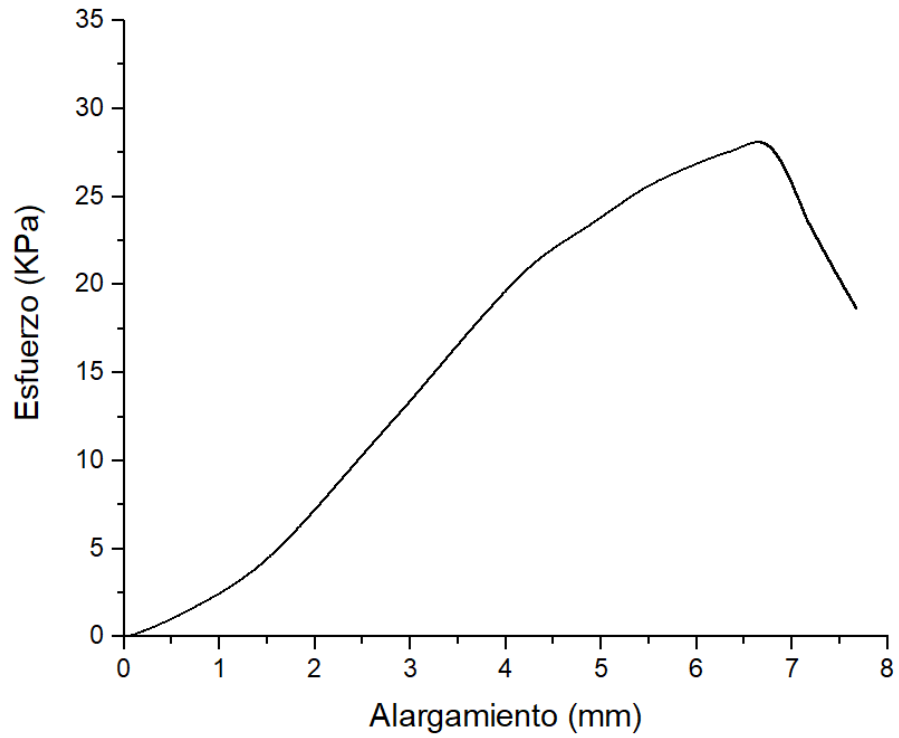


Figura 69. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T50) 2.

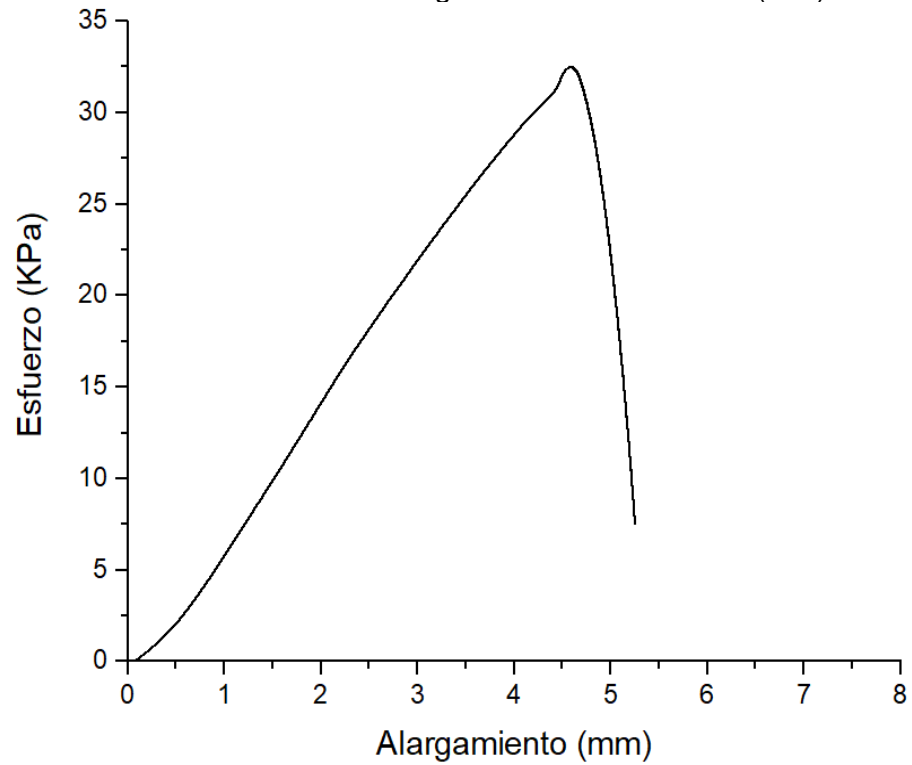


Figura 70. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T50) 3

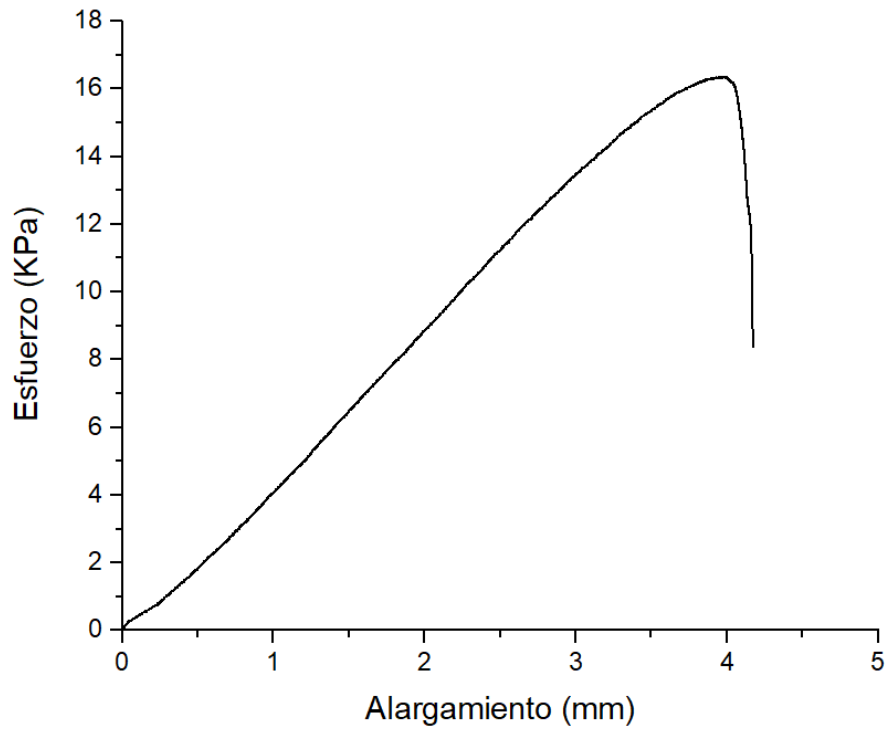


Figura 71. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T50) 4

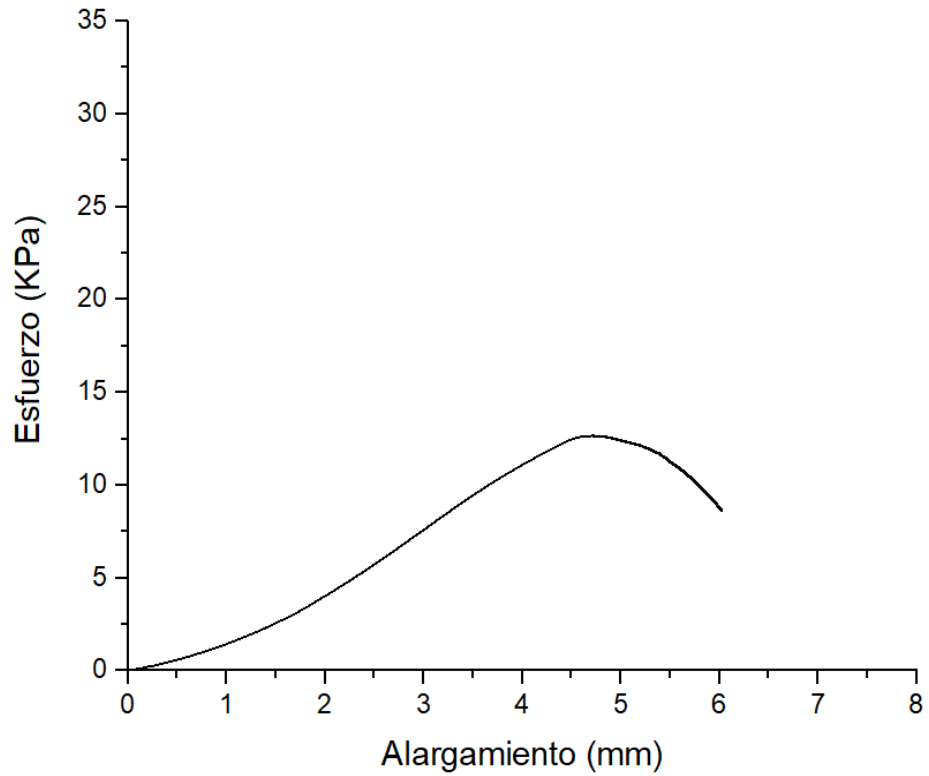


Figura 72. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T50) 5

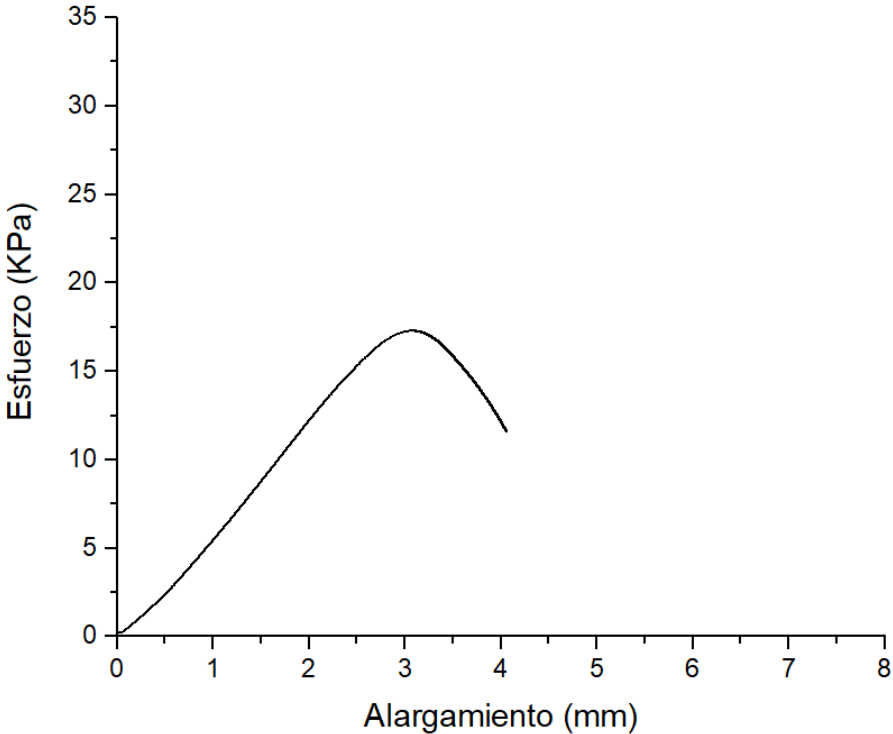


Figura 73. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T50) 6

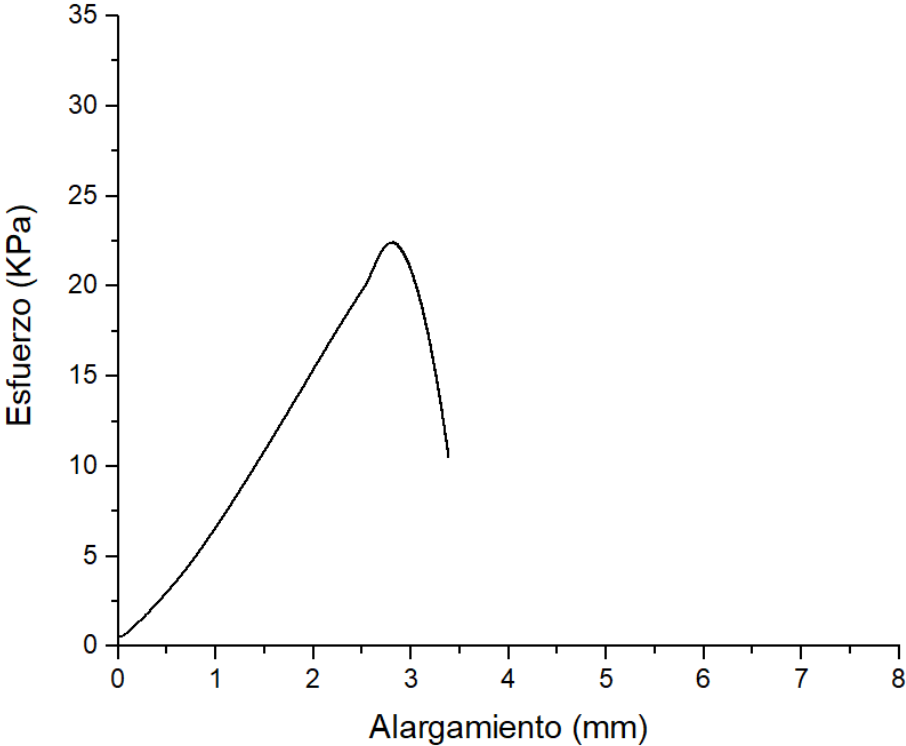


Figura 74. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T50) 7

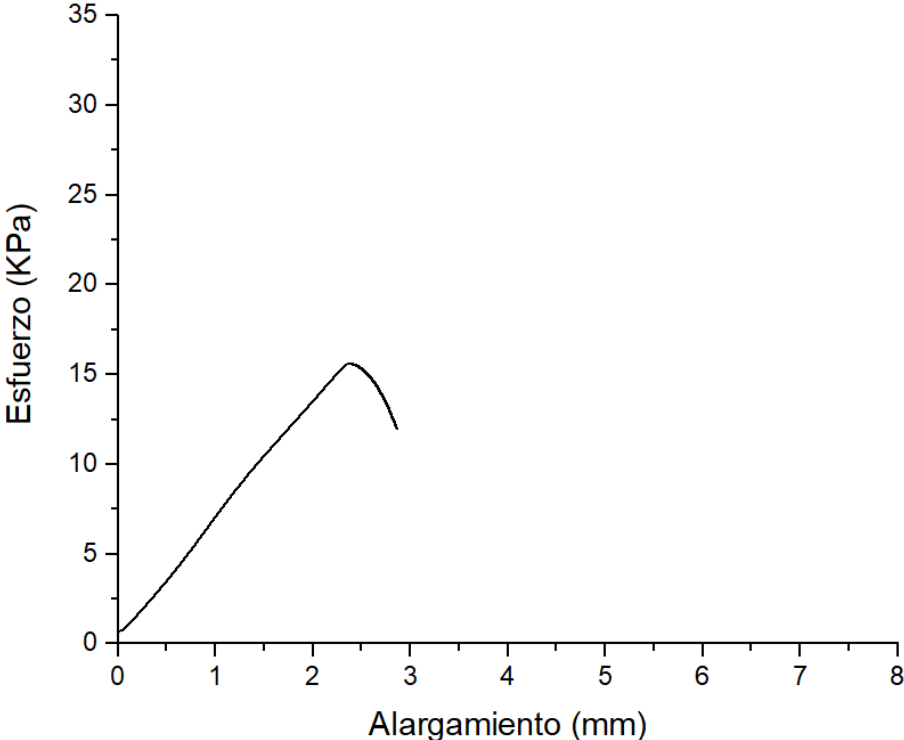


Figura 75. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T50) 8

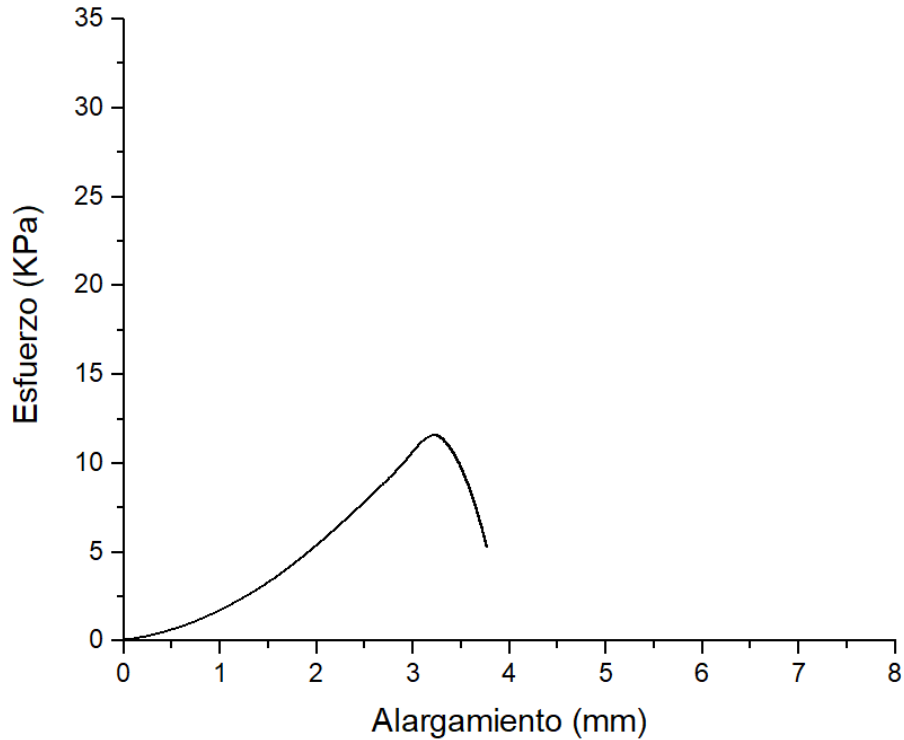


Figura 76. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T50) 9

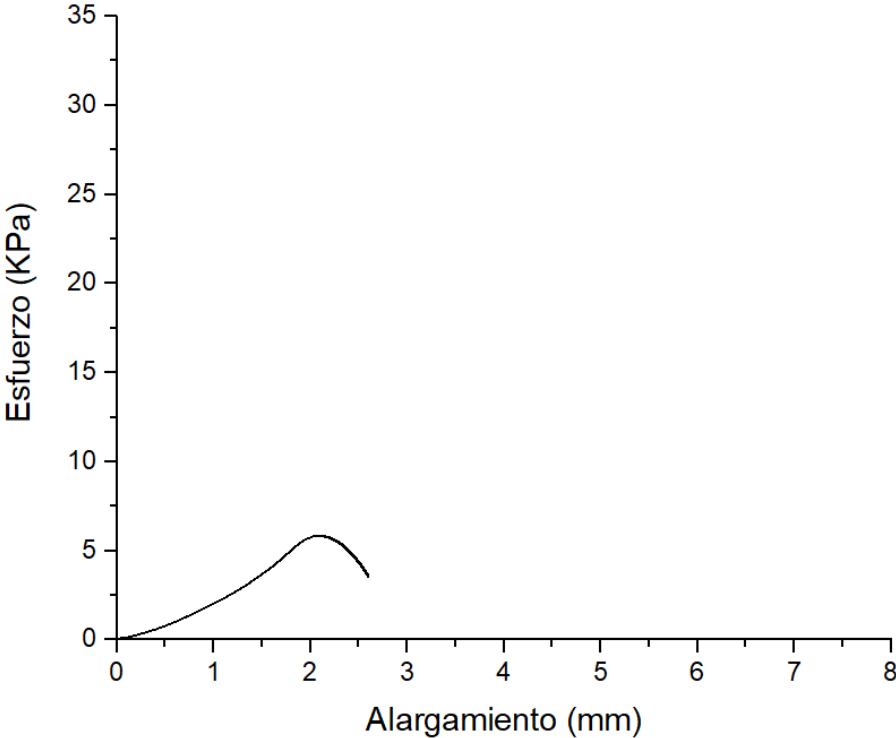


Figura 77. Prueba de flexión material de bagazo de caña de azúcar (T50) 10

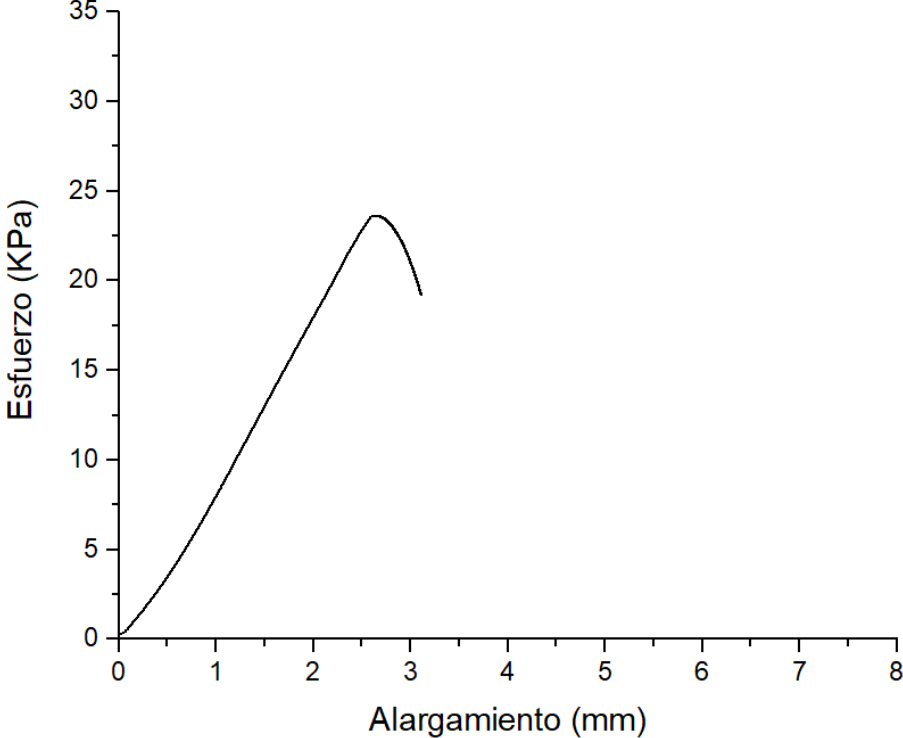




Figura 78. Prueba de flexión de poliestireno expandido (EPS) 1

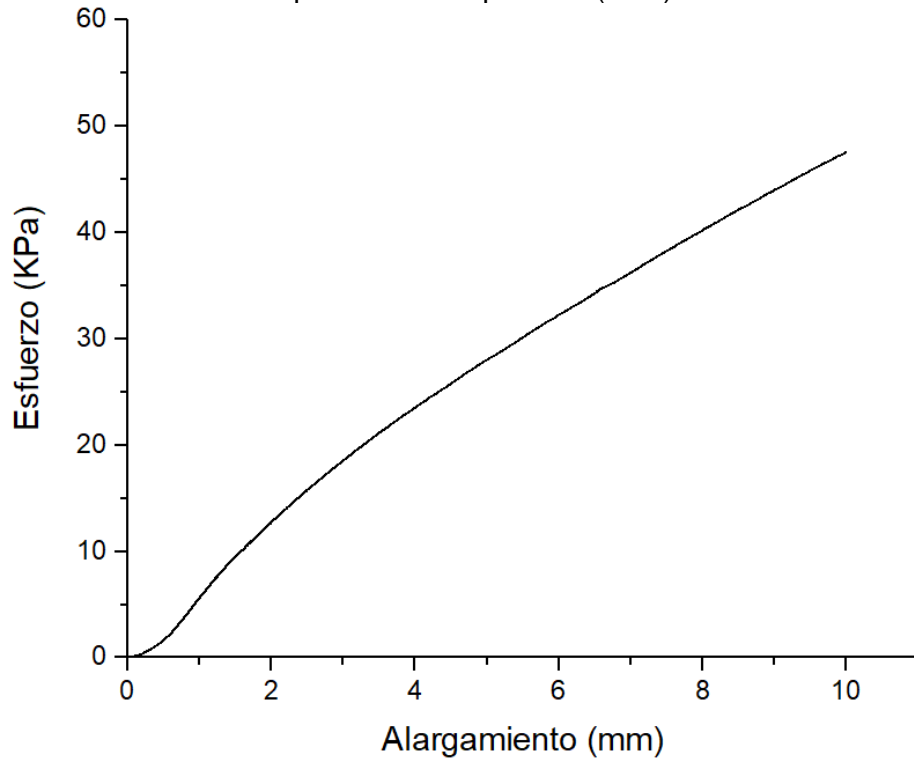


Figura 79. Prueba de flexión de poliestireno expandido (EPS) 2

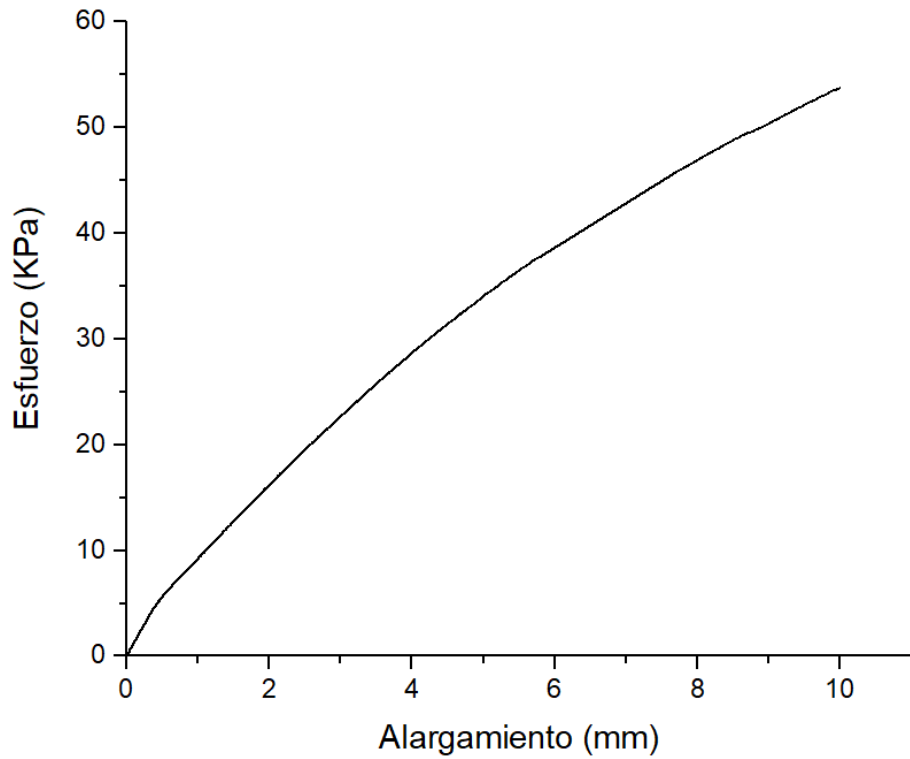


Figura 80. Prueba de flexión de poliestireno expandido (EPS) 3

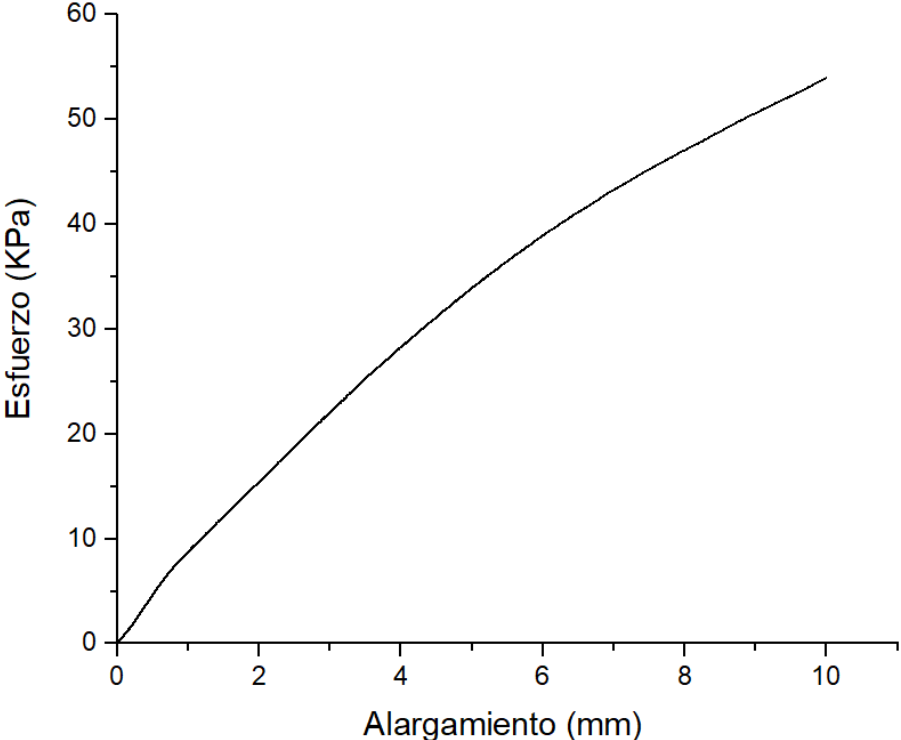


Figura 81. Prueba de flexión de poliestireno expandido (EPS) 4

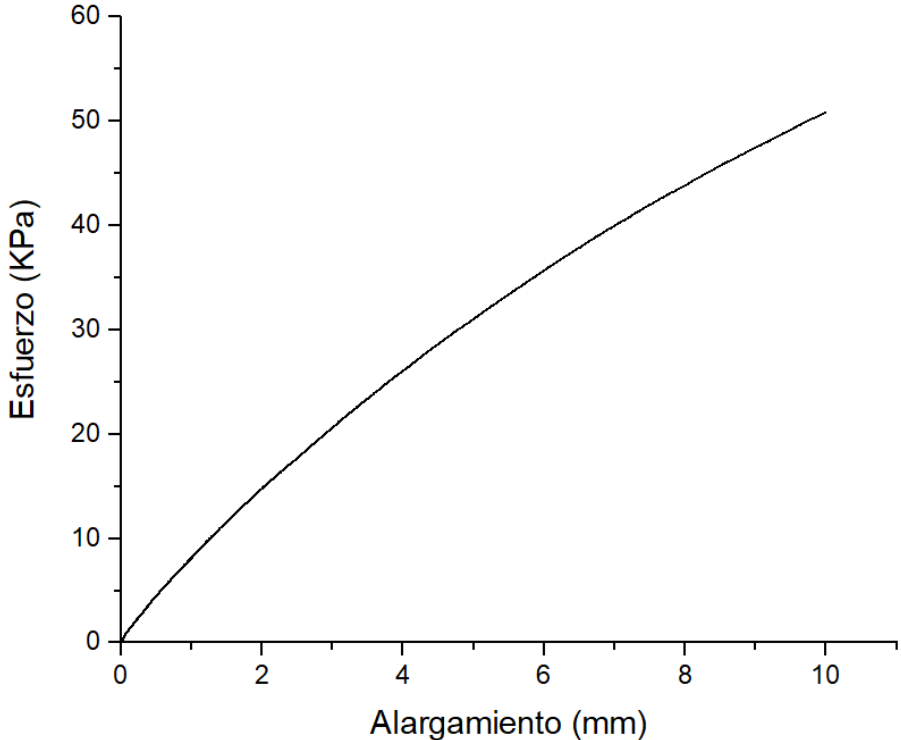


Figura 82. Prueba de flexión de poliestireno expandido (EPS) 5.

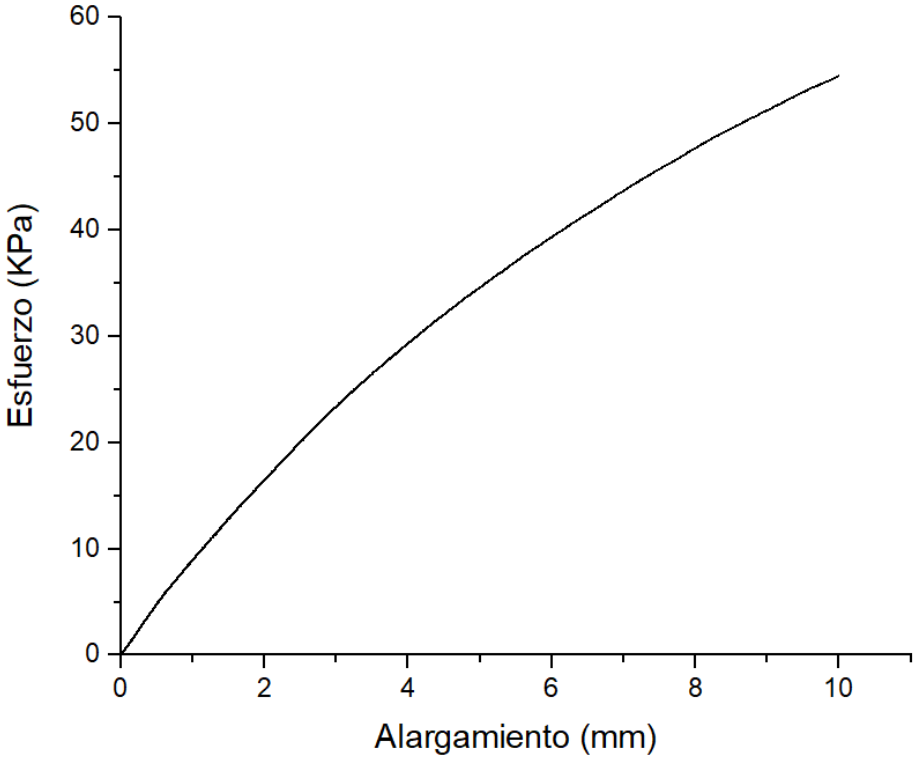


Figura 83. Prueba de flexión de poliestireno expandido (EPS) 6

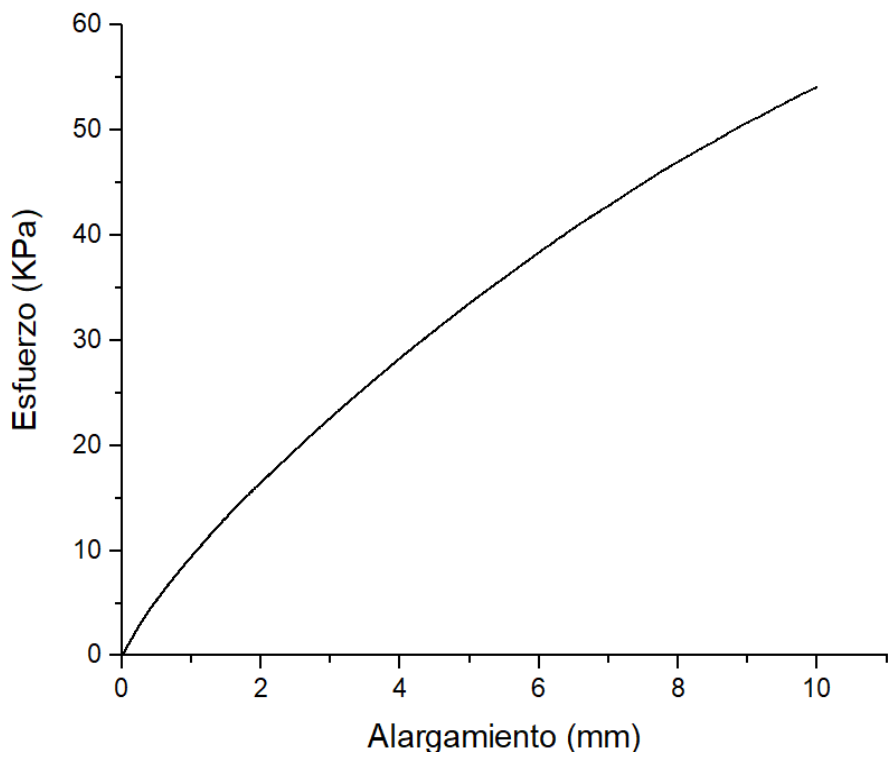


Figura 84. Prueba de flexión de poliestireno expandido (EPS) 7

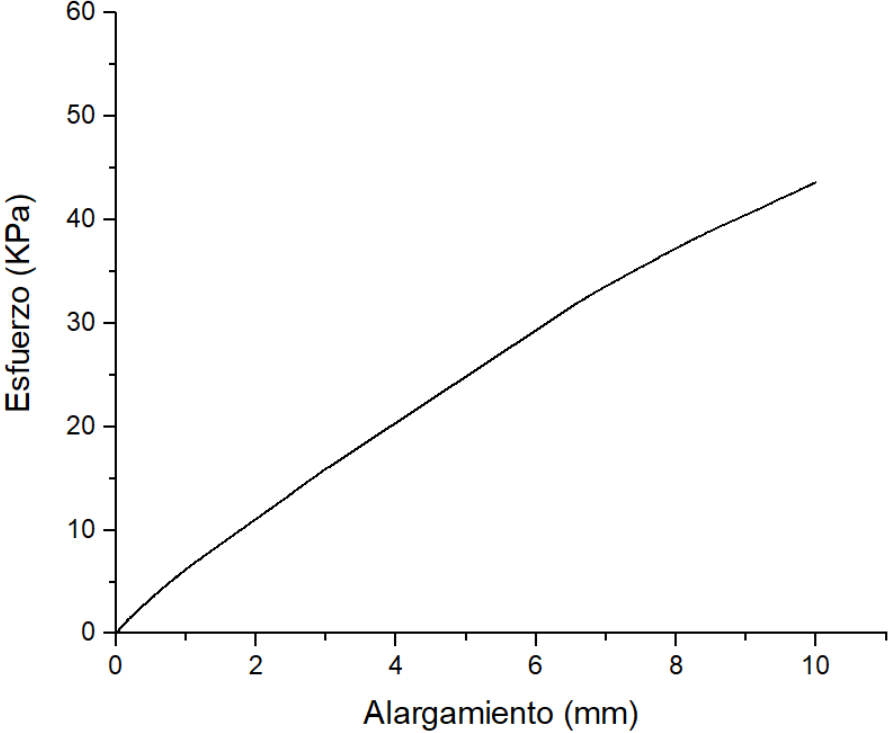


Figura 85. Prueba de flexión de poliestireno expandido (EPS) 8

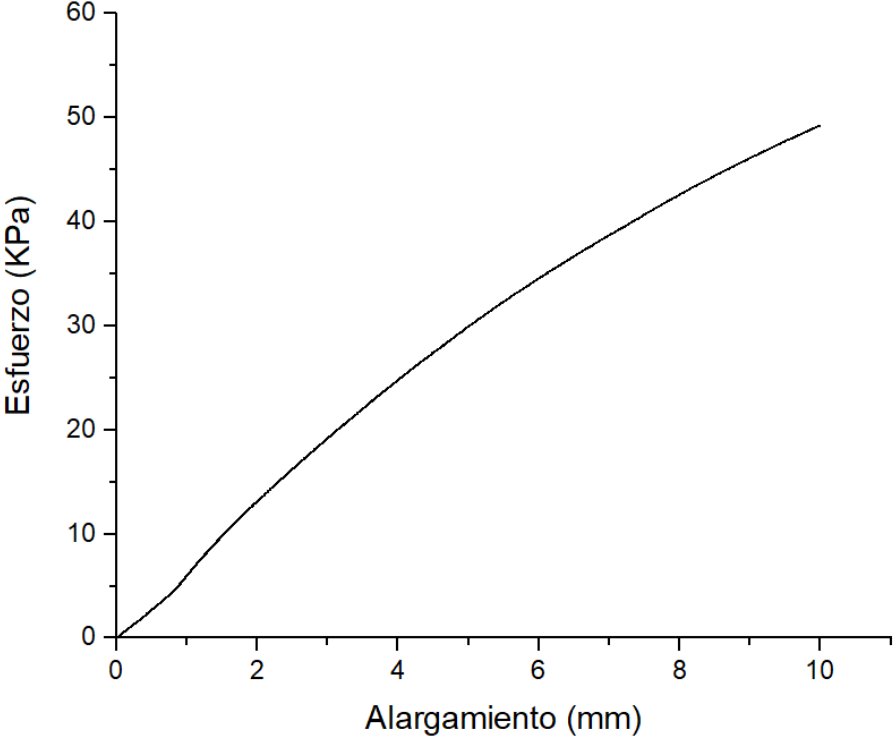


Figura 86. Prueba de flexión de poliestireno expandido (EPS) 9

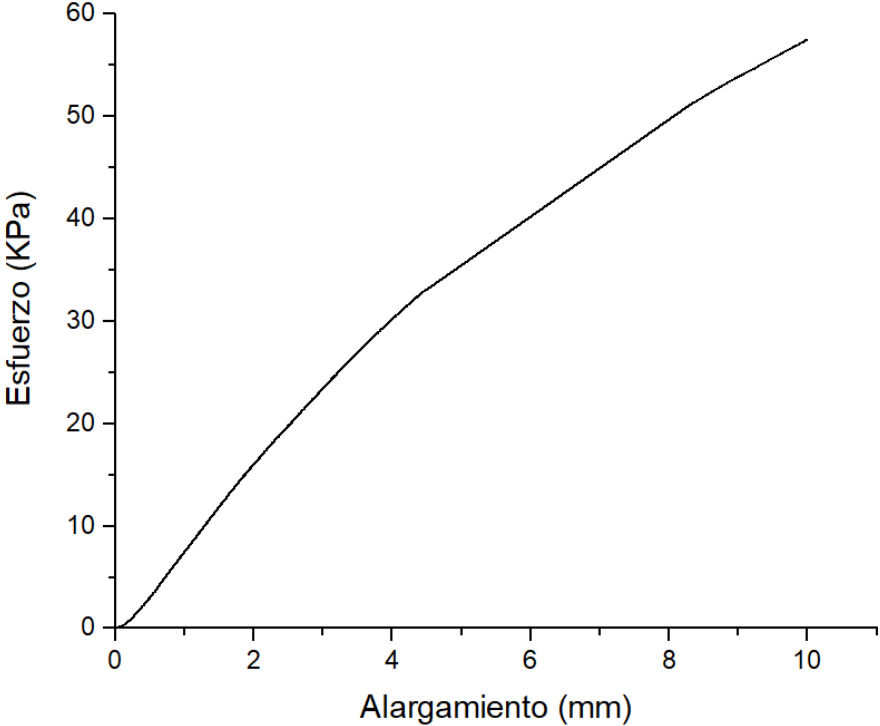


Figura 87. Prueba de flexión de poliestireno expandido (EPS) 10

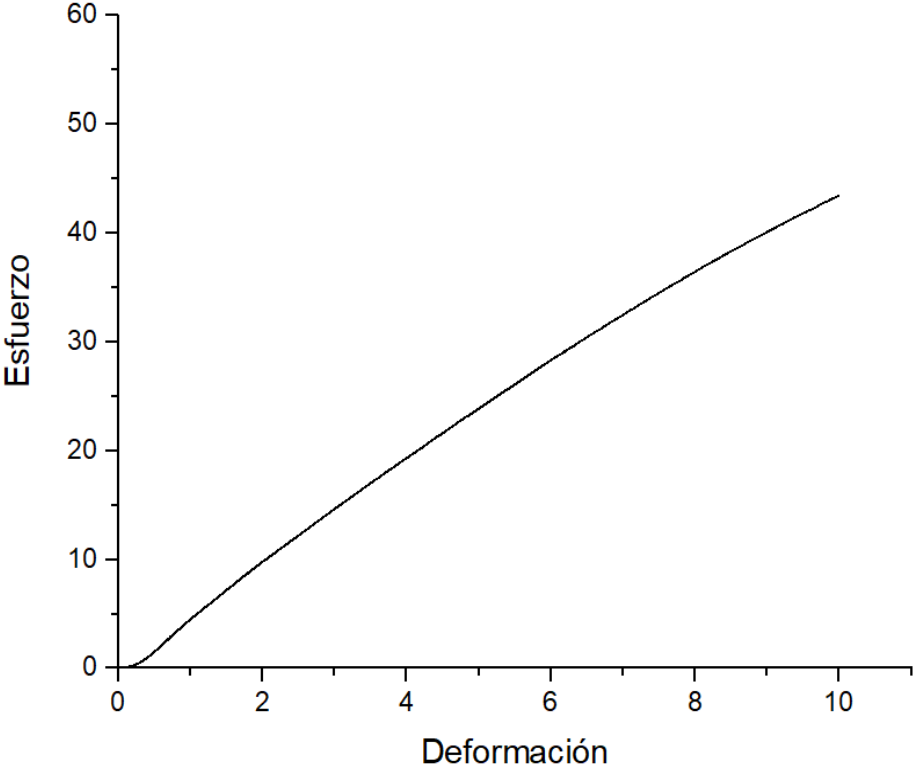


Figura 88. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T16) 1.

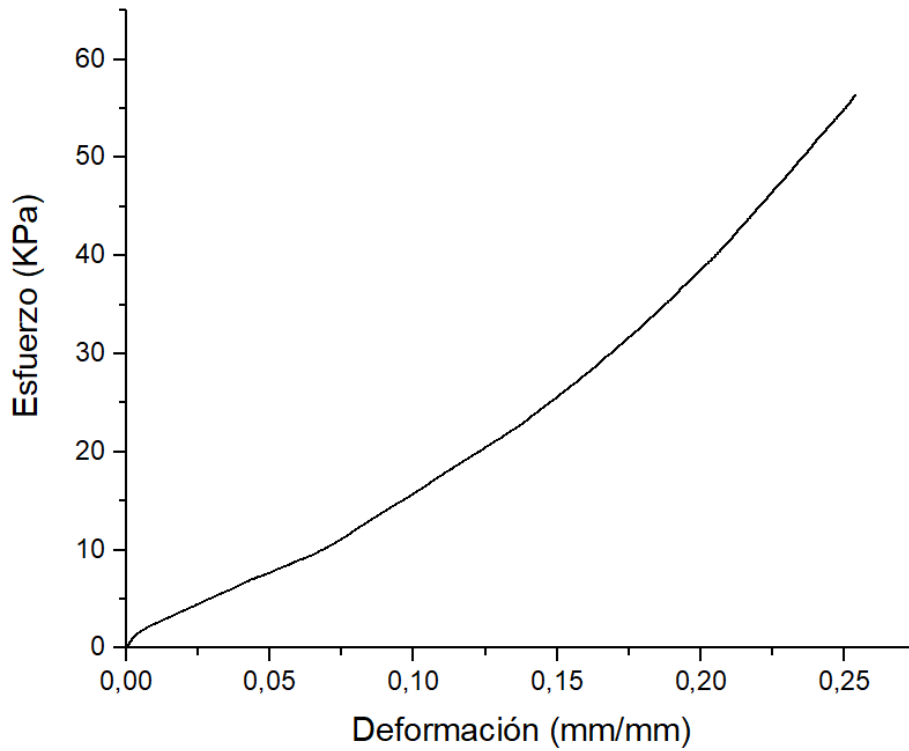


Figura 89. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T16) 2.

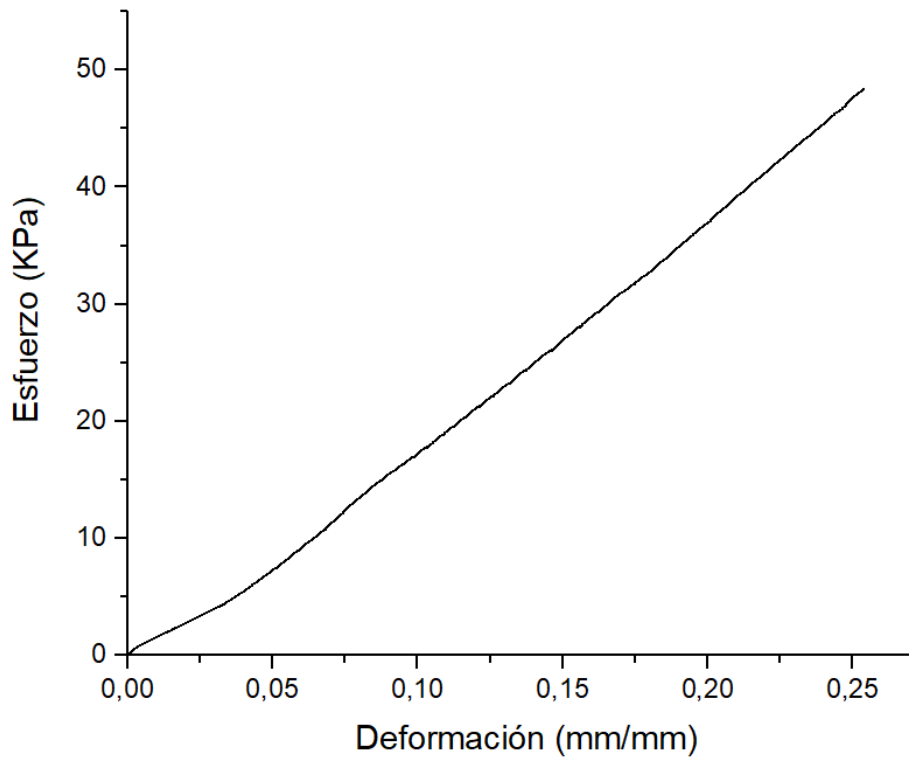


Figura 90. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T16) 3.

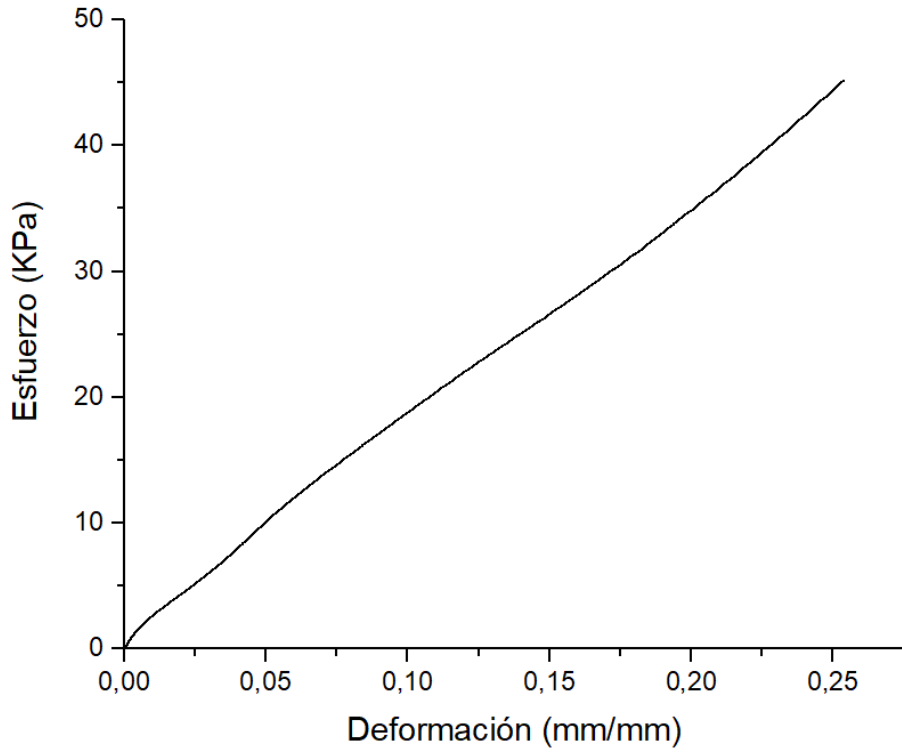


Figura 91. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T16) 4.

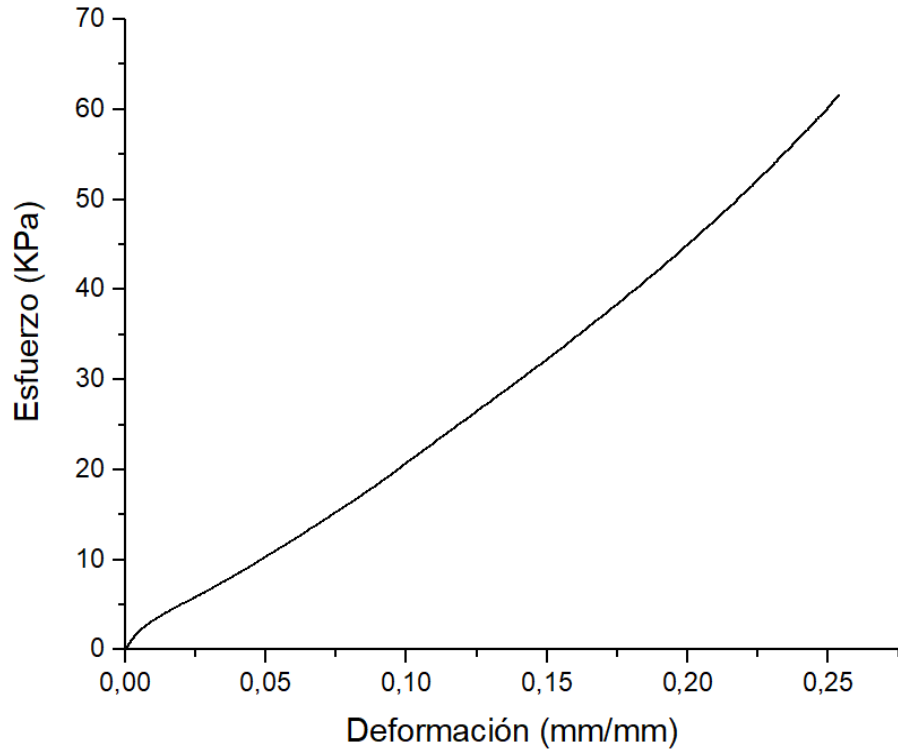


Figura 92. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T16) 5.

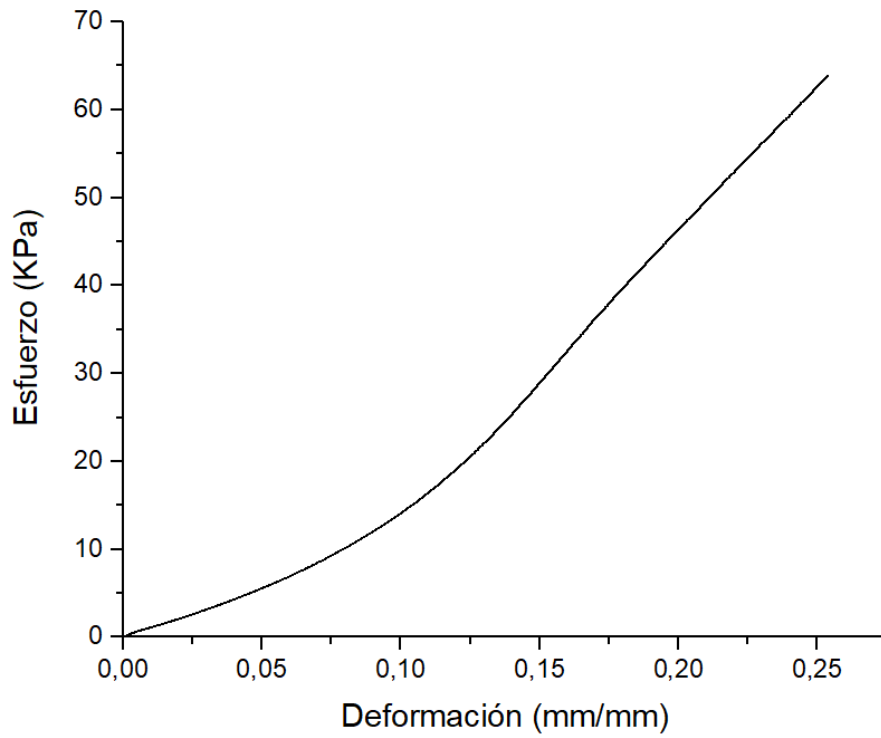


Figura 93. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T16) 6.

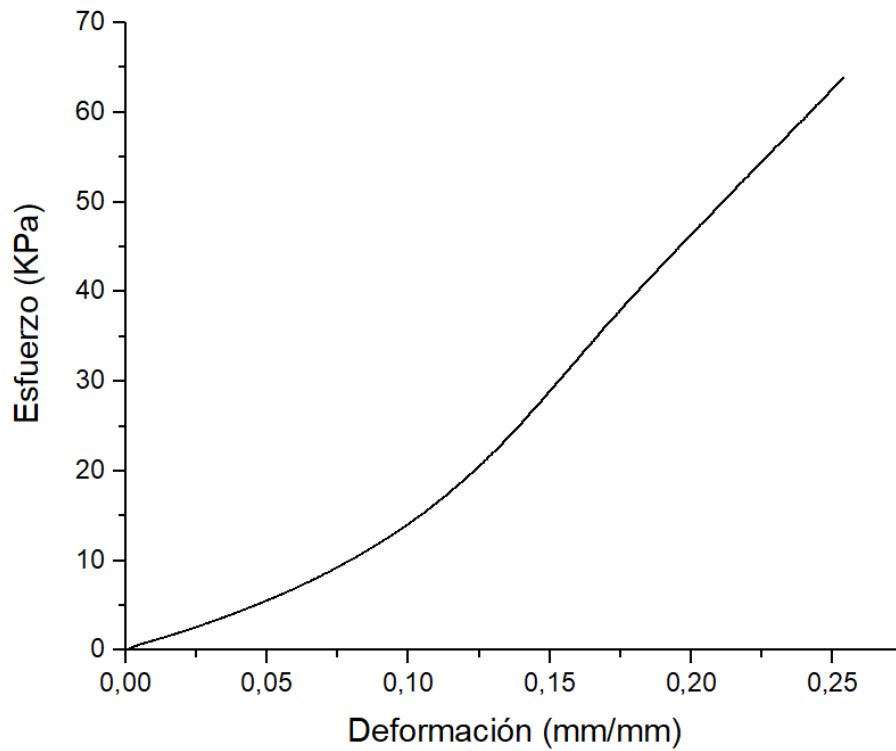




Figura 94. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T16) 7.

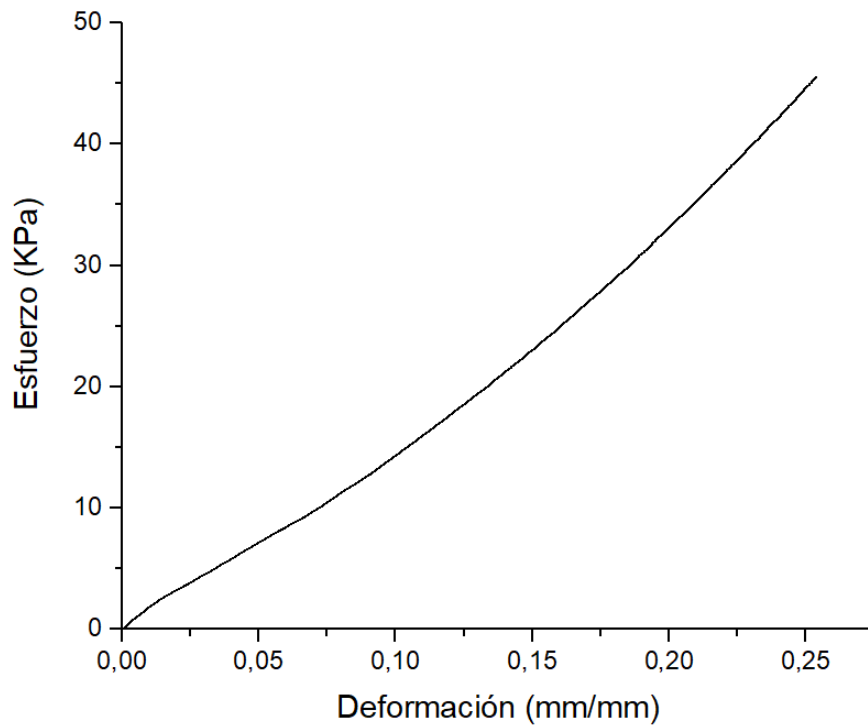


Figura 95. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T16) 8

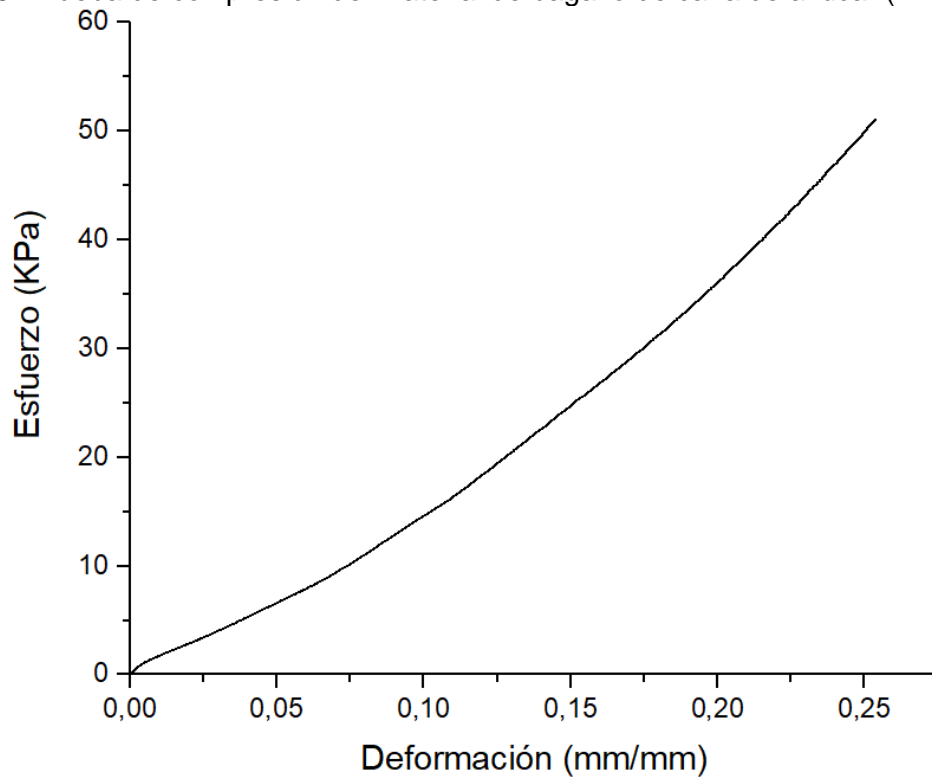


Figura 96. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T16) 9.

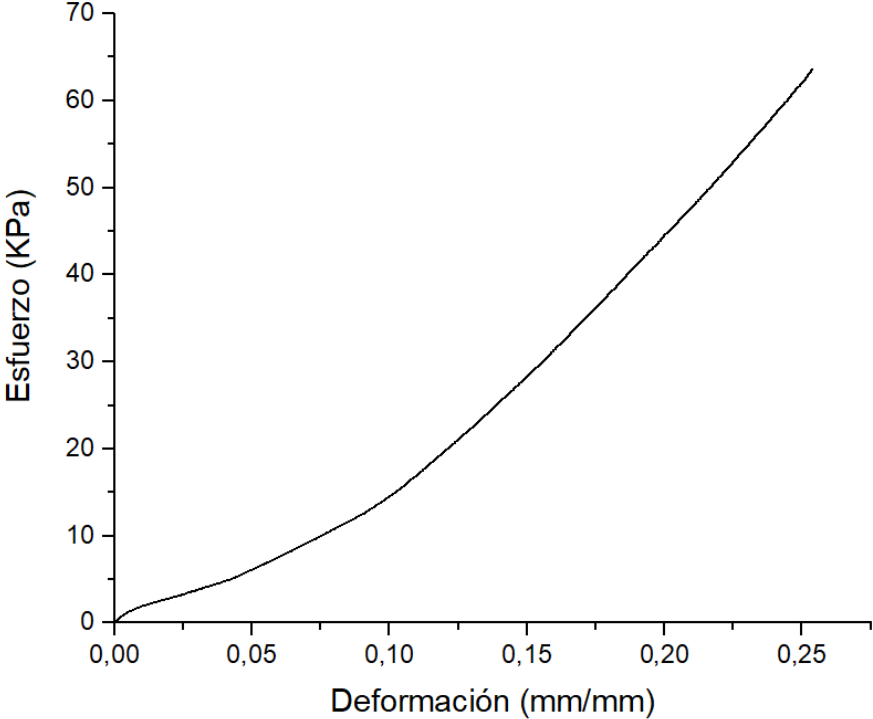


Figura 97. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T16) 10.

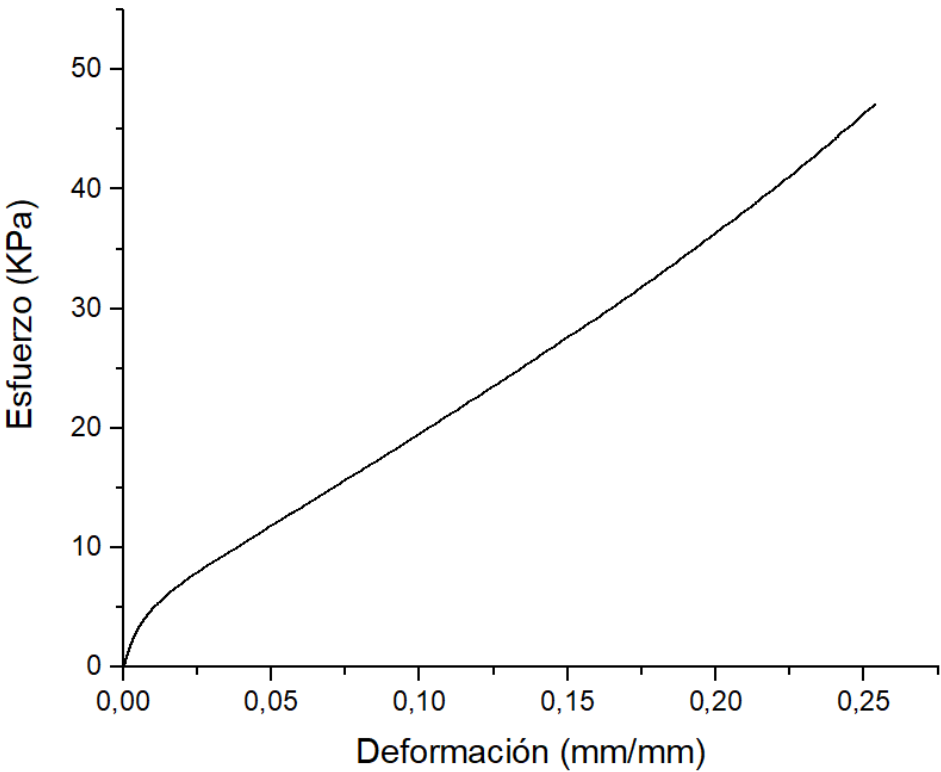


Figura 98. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T50) 1.

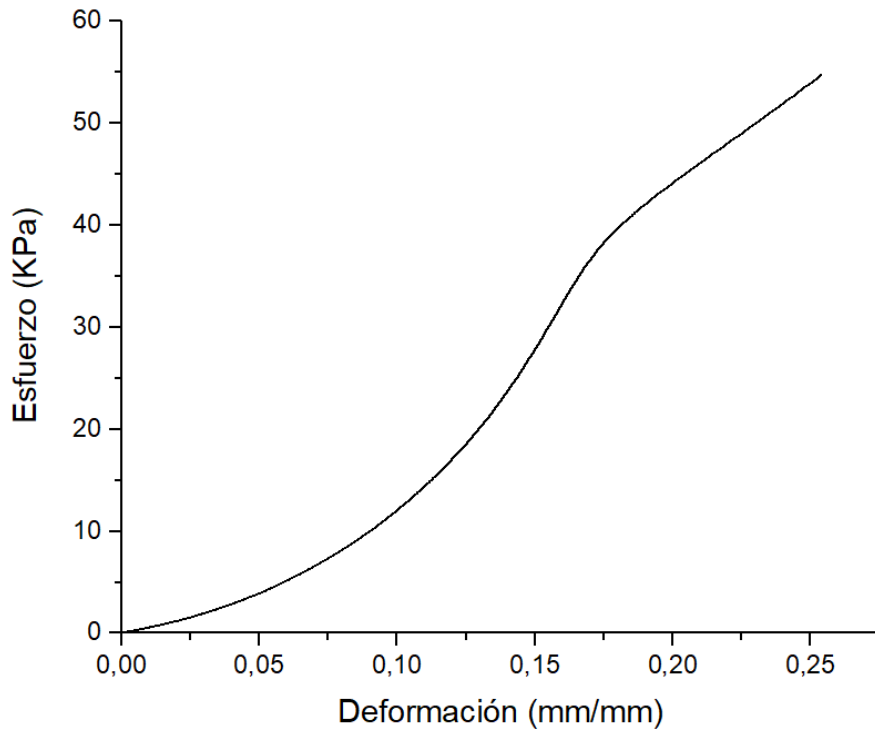


Figura 99. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T50) 2.

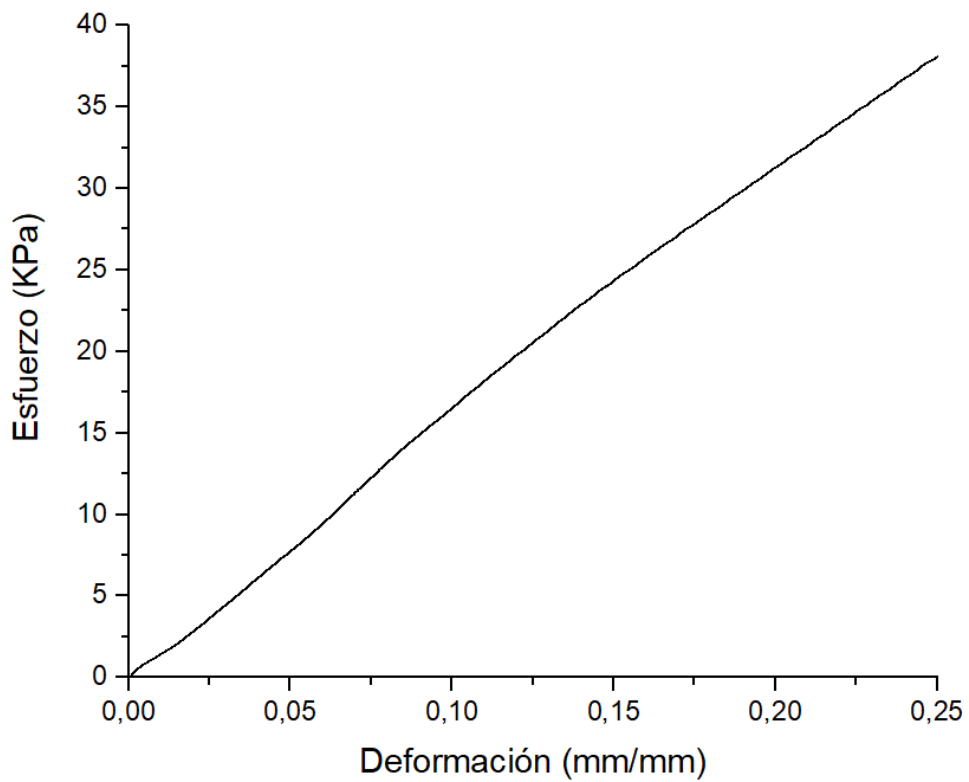


Figura 100. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T50) 3.

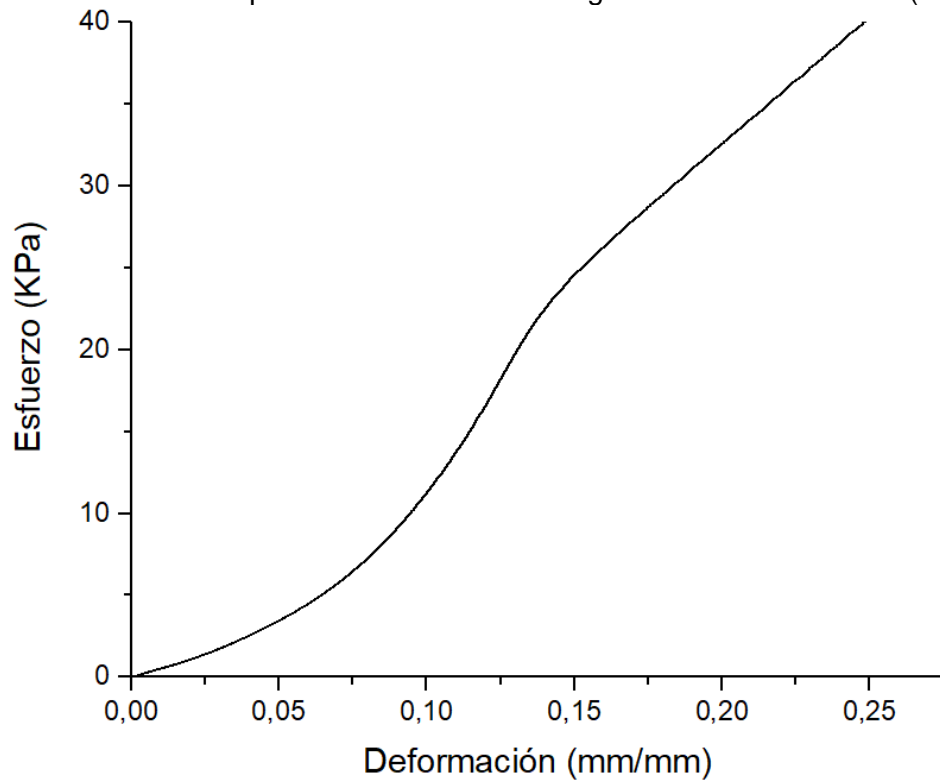


Figura 101. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T50) 4.

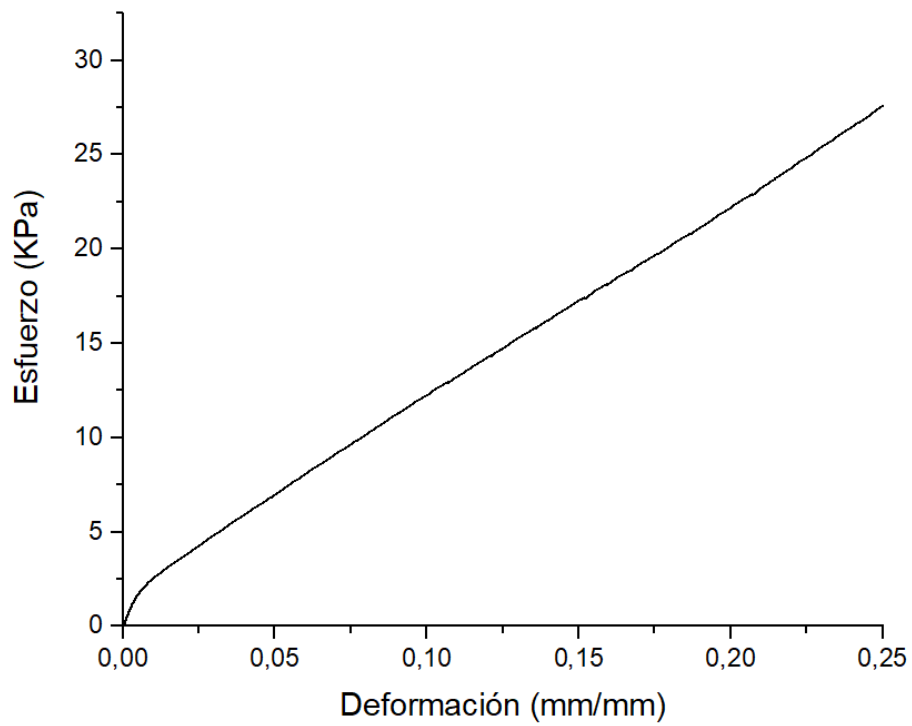


Figura 102. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T50) 5.

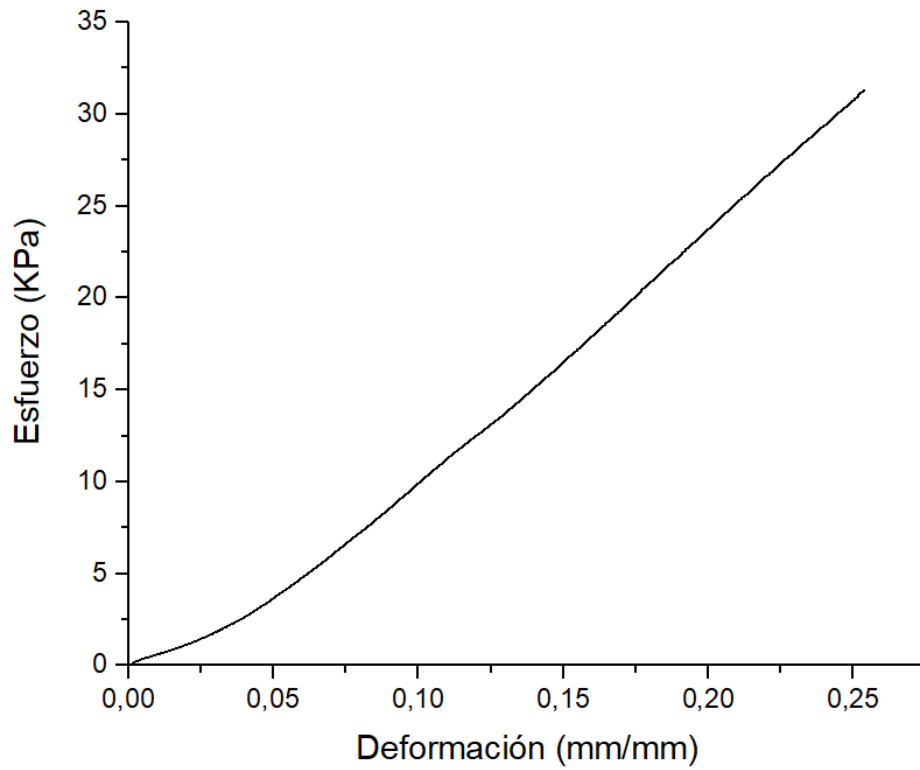


Figura 103. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T50) 6.

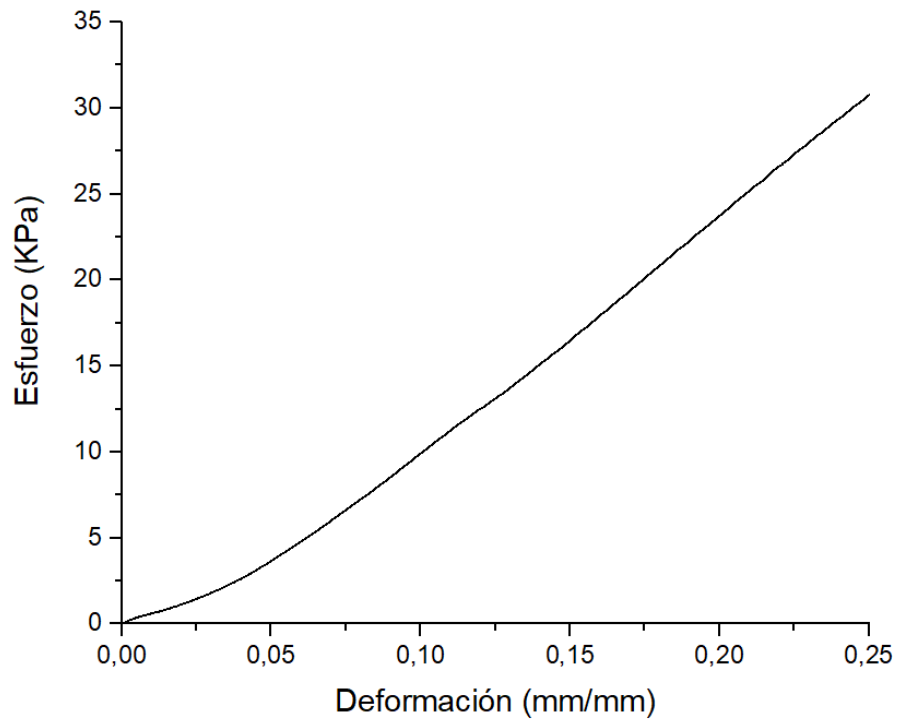


Figura 104. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T50) 7.

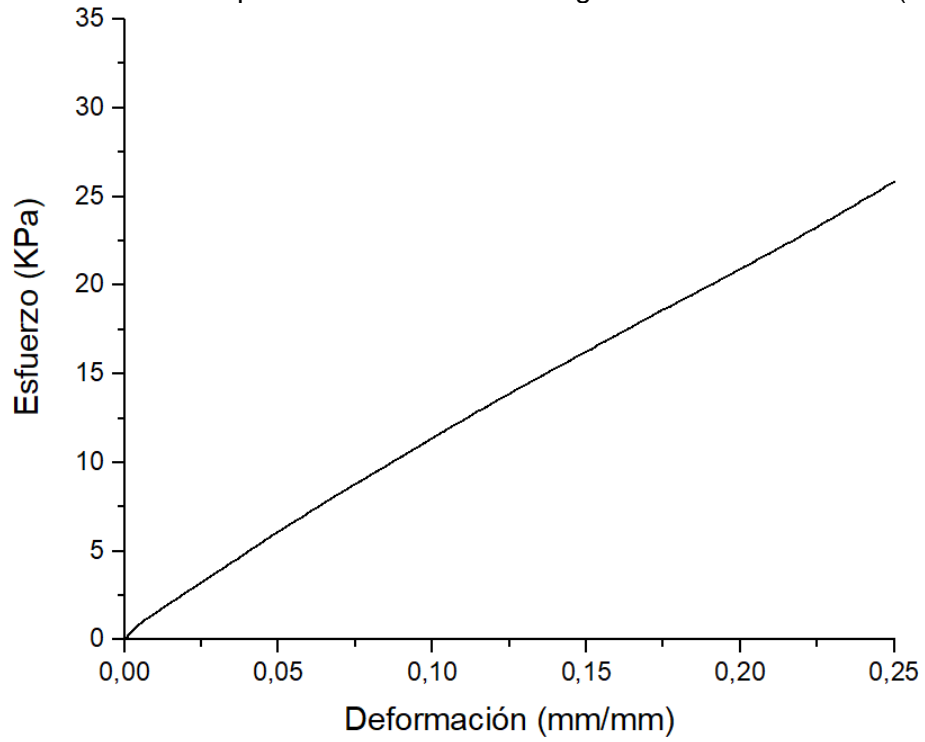


Figura 105. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T50) 8.

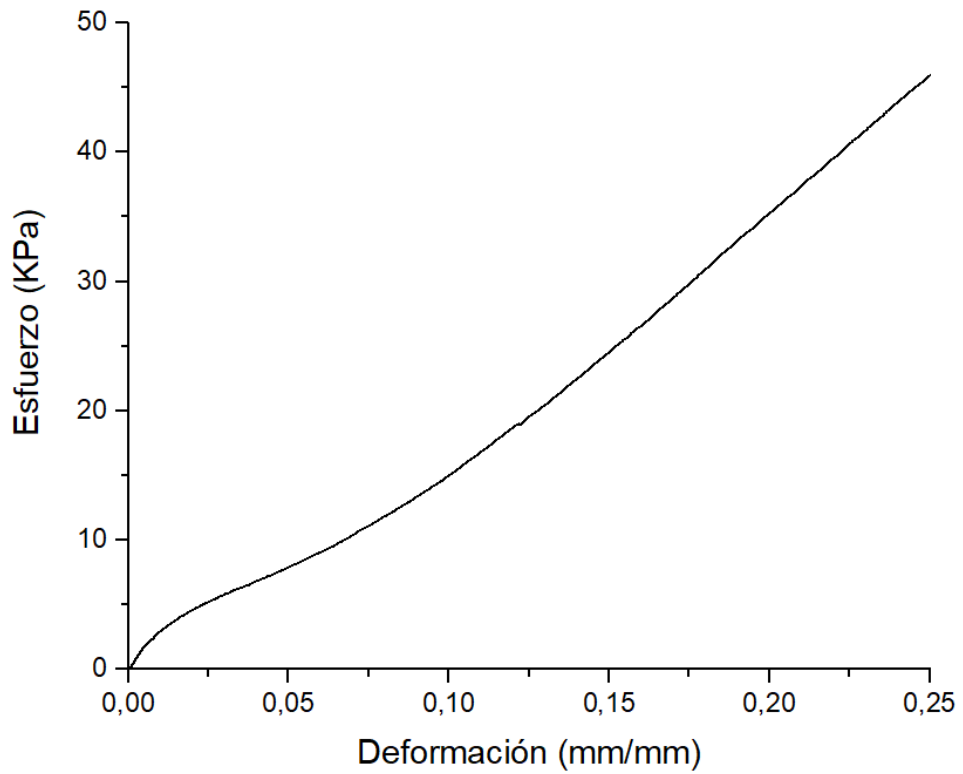


Figura 106. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T50) 9.

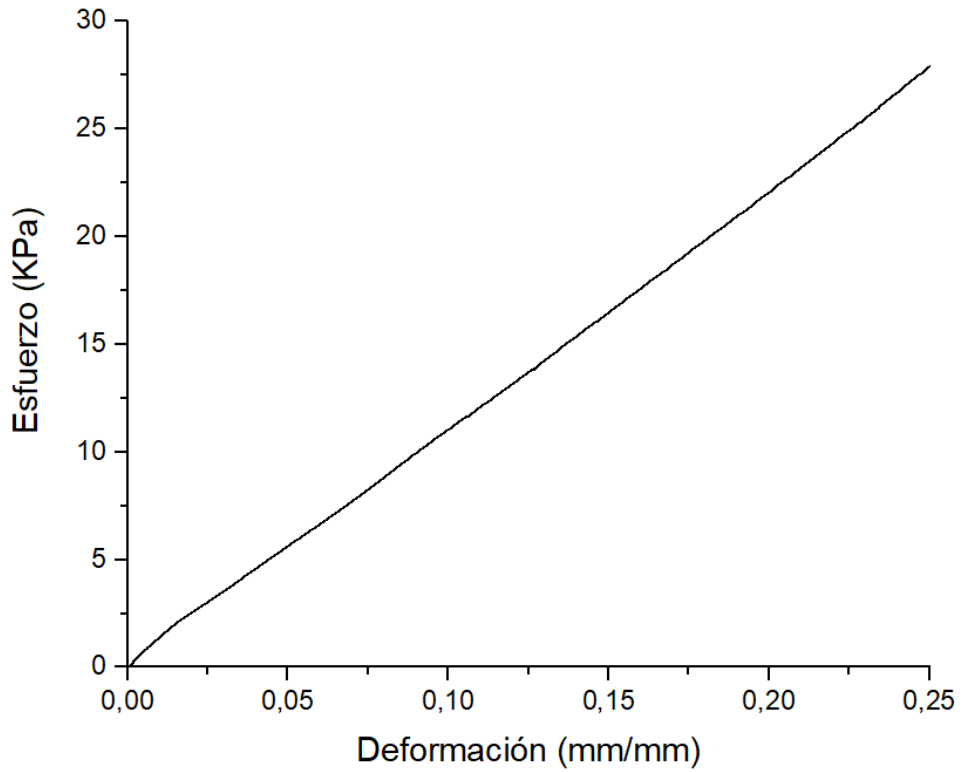


Figura 107. Prueba de compresión del material de bagazo de caña de azúcar (T50) 10.

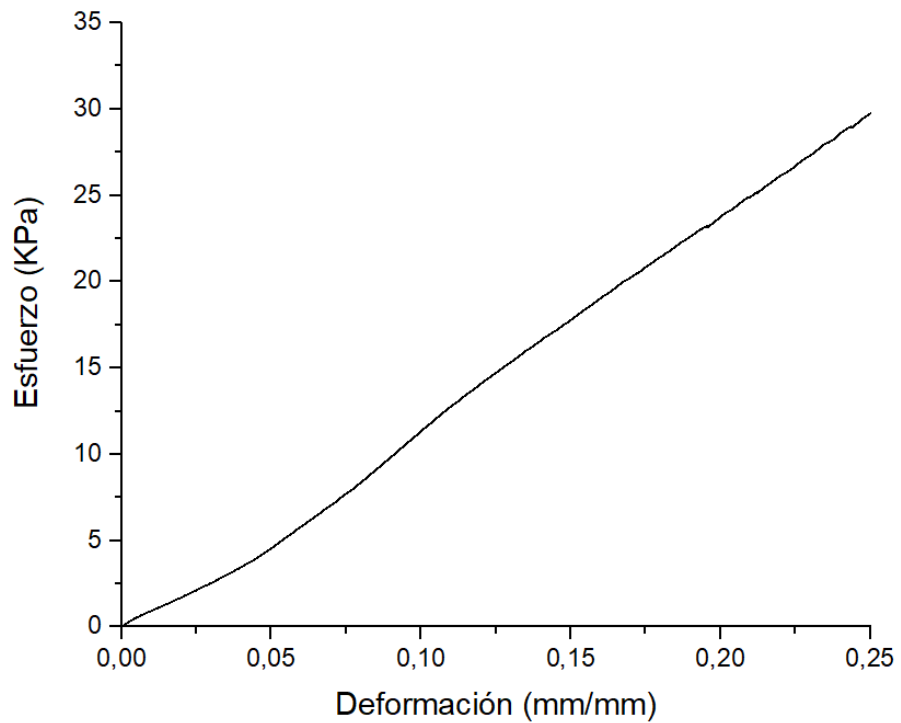


Figura 108. Prueba de compresión de poliestireno expandido (EPS) 1.

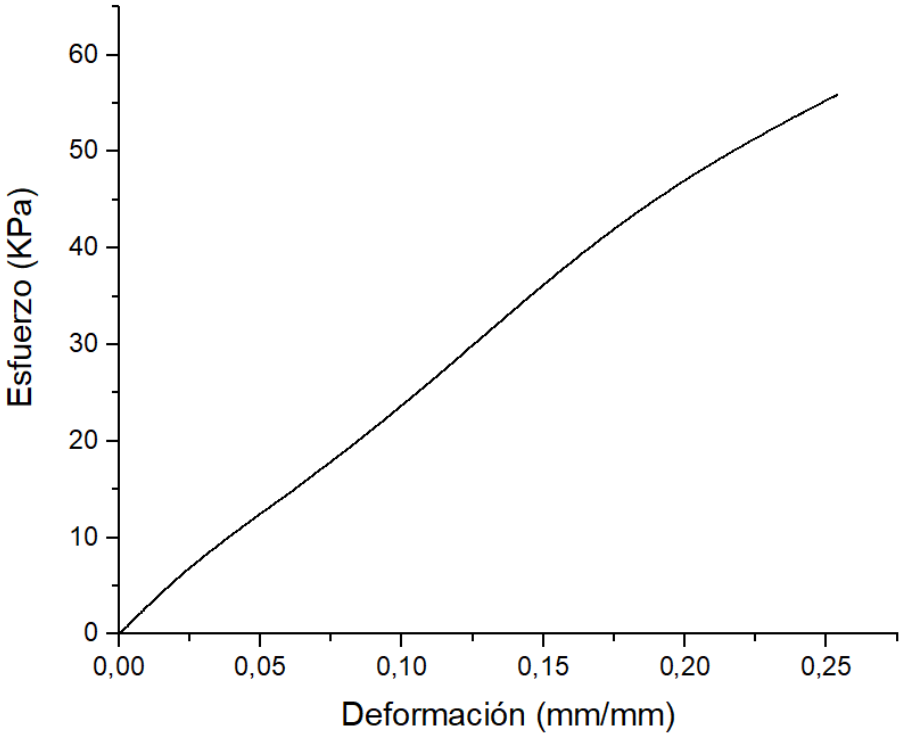


Figura 109. Prueba de compresión de poliestireno expandido (EPS) 2.

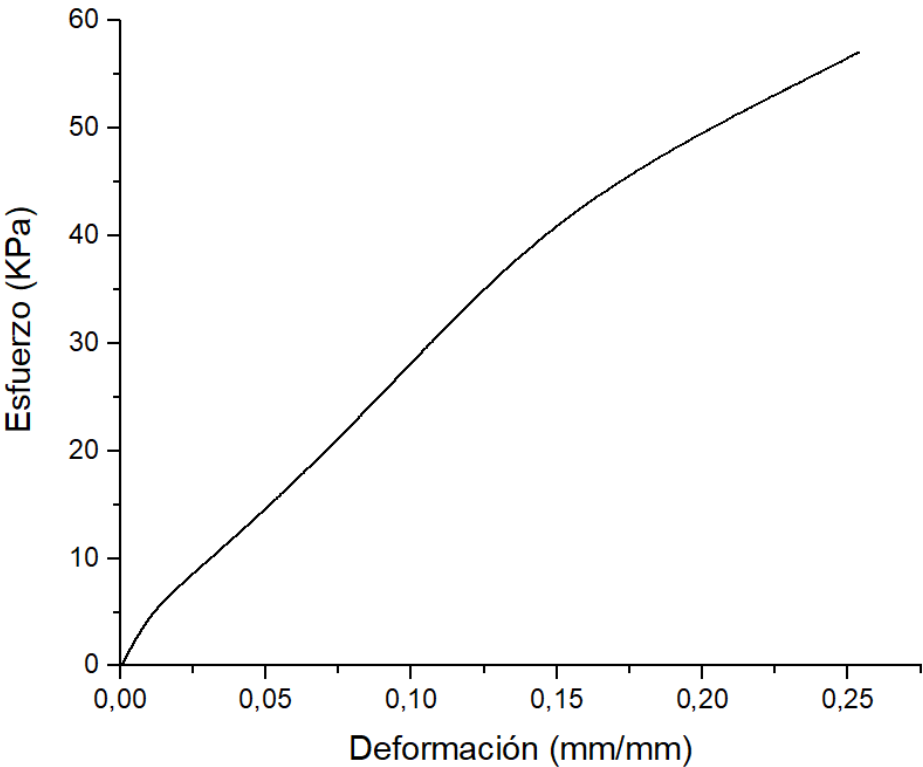




Figura 110. Prueba de compresión de poliestireno expandido (EPS) 3.

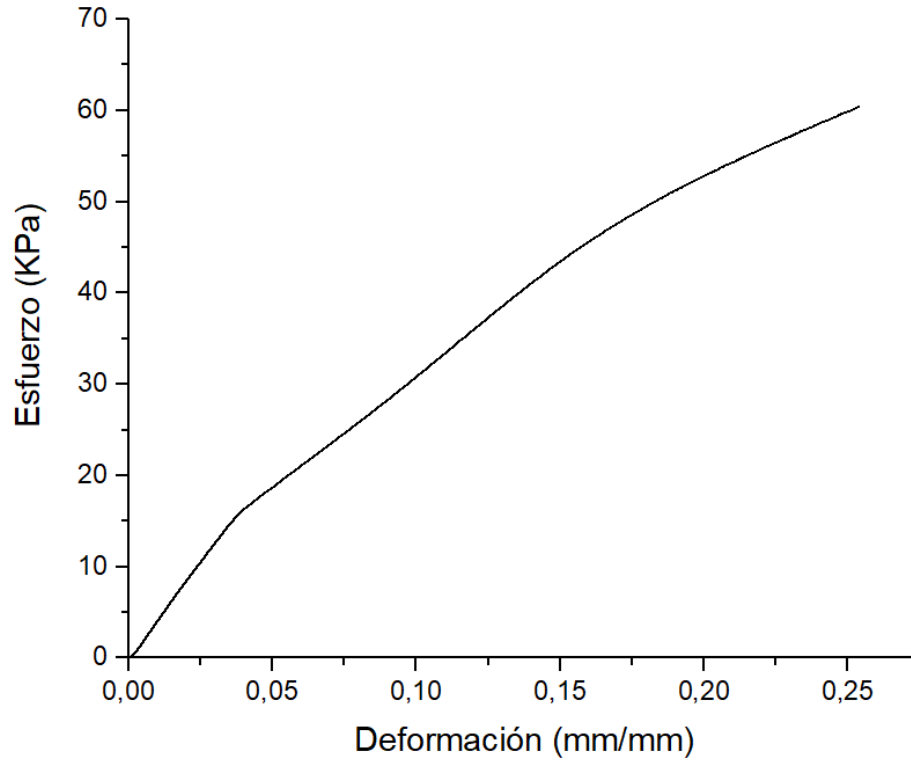


Figura 111. Prueba de compresión de poliestireno expandido (EPS) 4.

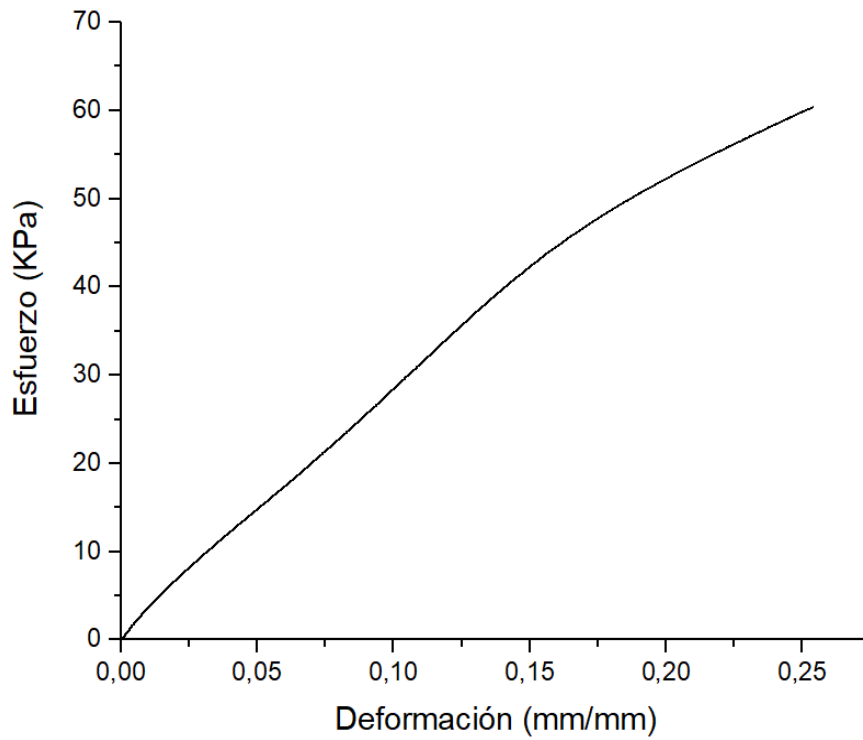


Figura 112. Prueba de compresión de poliestireno expandido (EPS) 5.

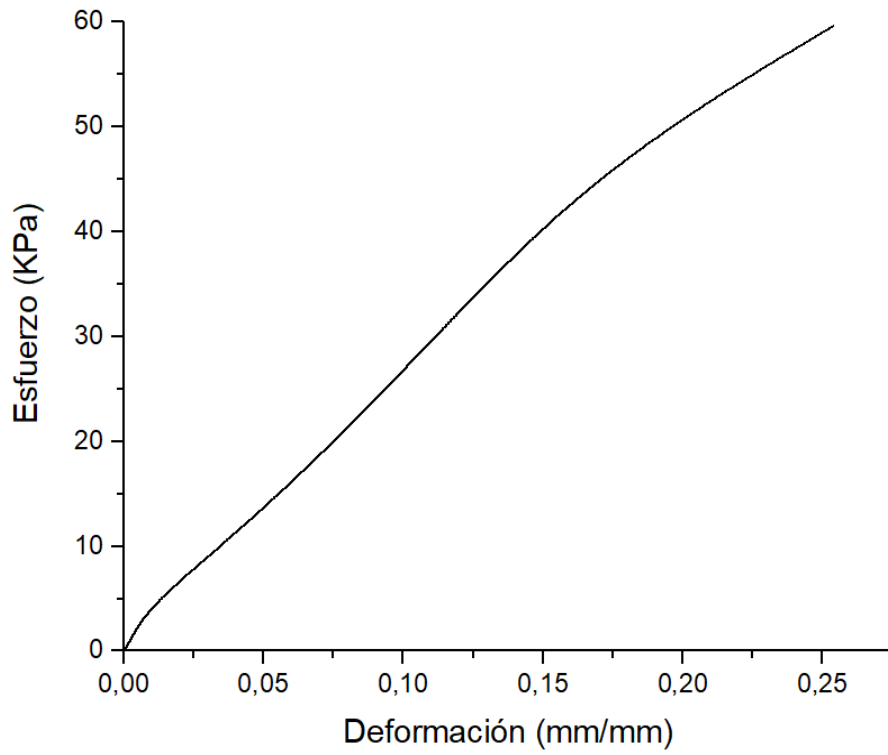


Figura 113. Prueba de compresión de poliestireno expandido (EPS) 6.

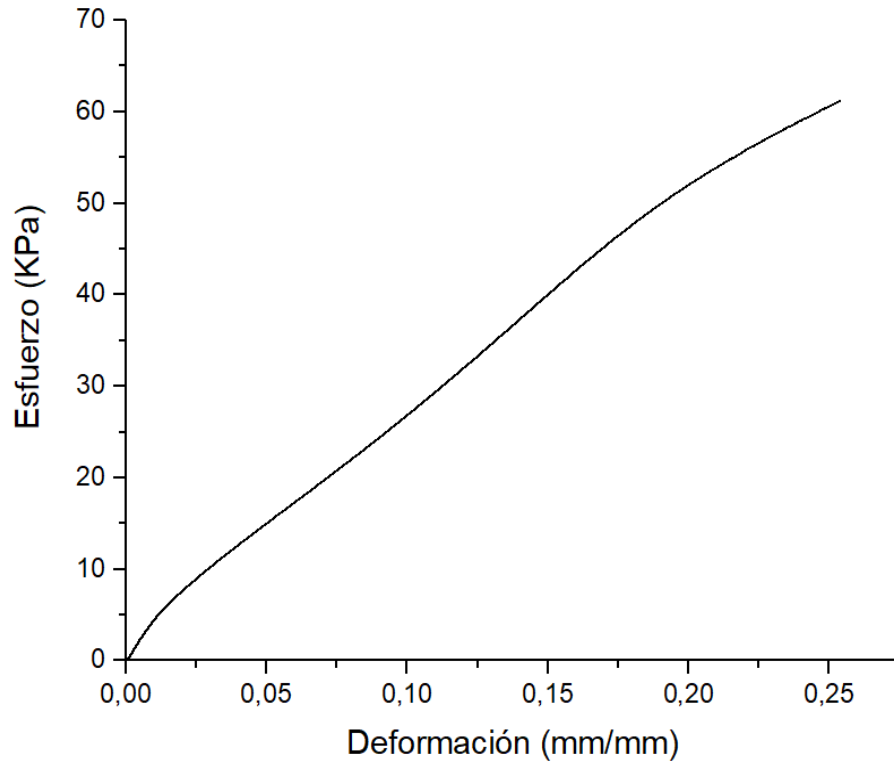


Figura 114. Prueba de compresión de poliestireno expandido (EPS) 7.

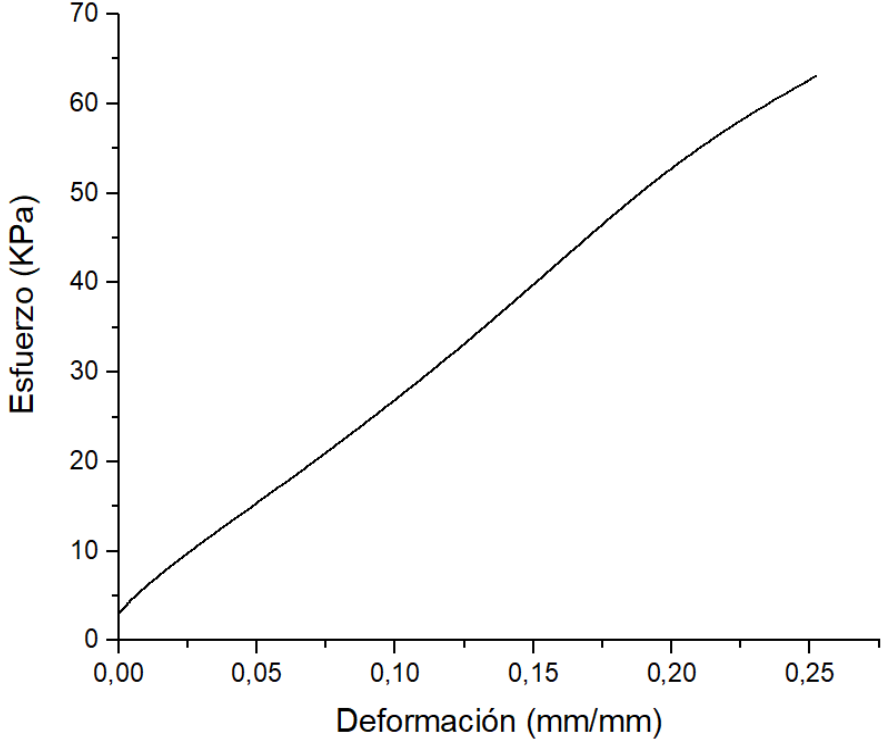


Figura 115. Prueba de compresión de poliestireno expandido (EPS) 8.

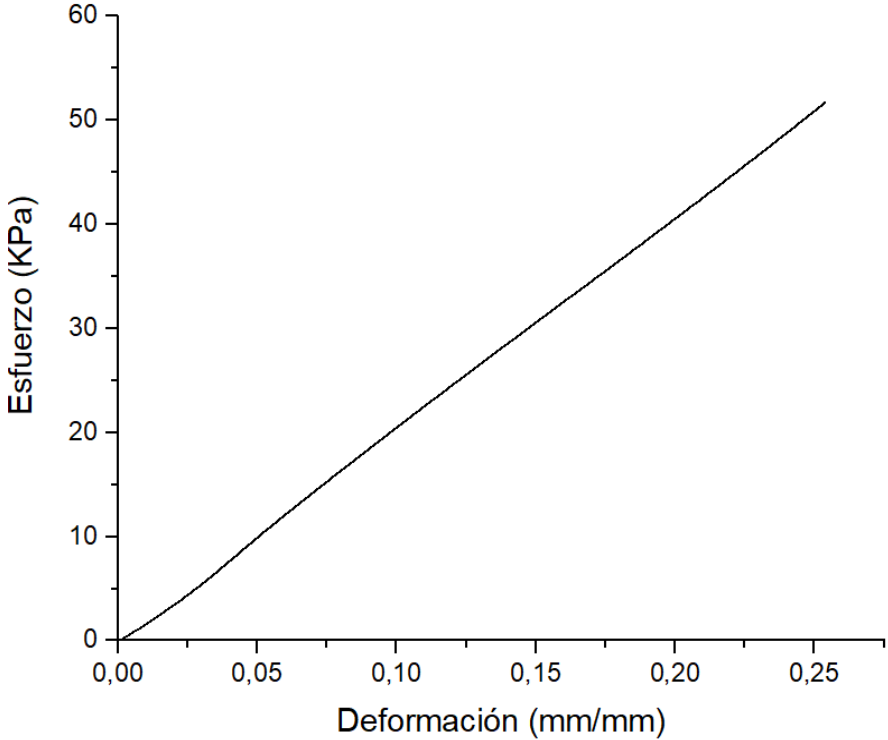


Figura 116. Prueba de compresión de poliestireno expandido (EPS) 9.

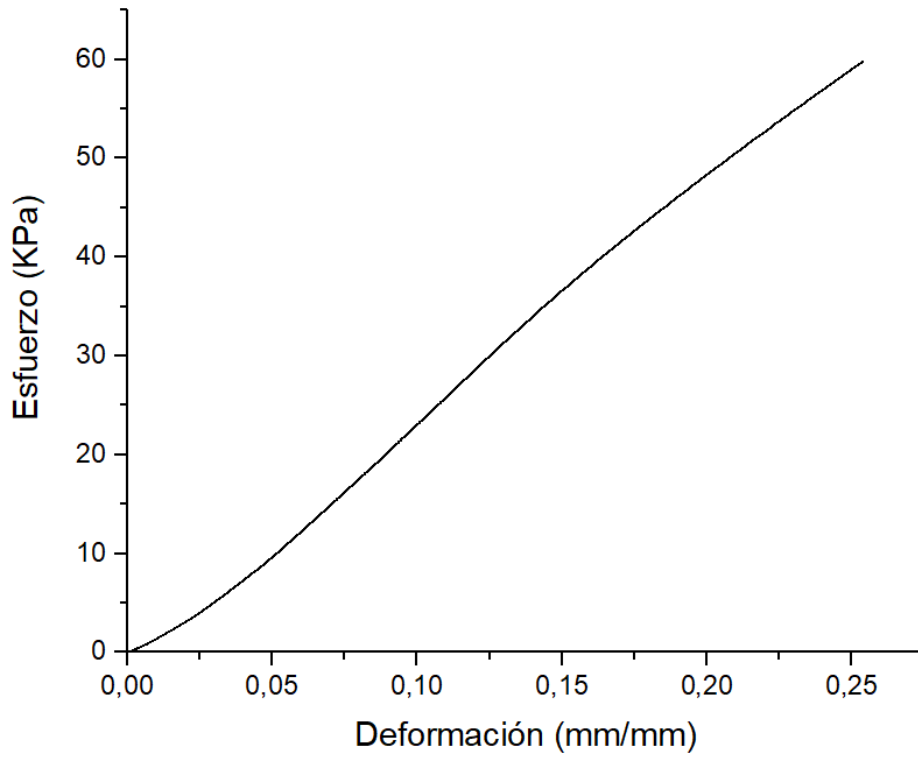
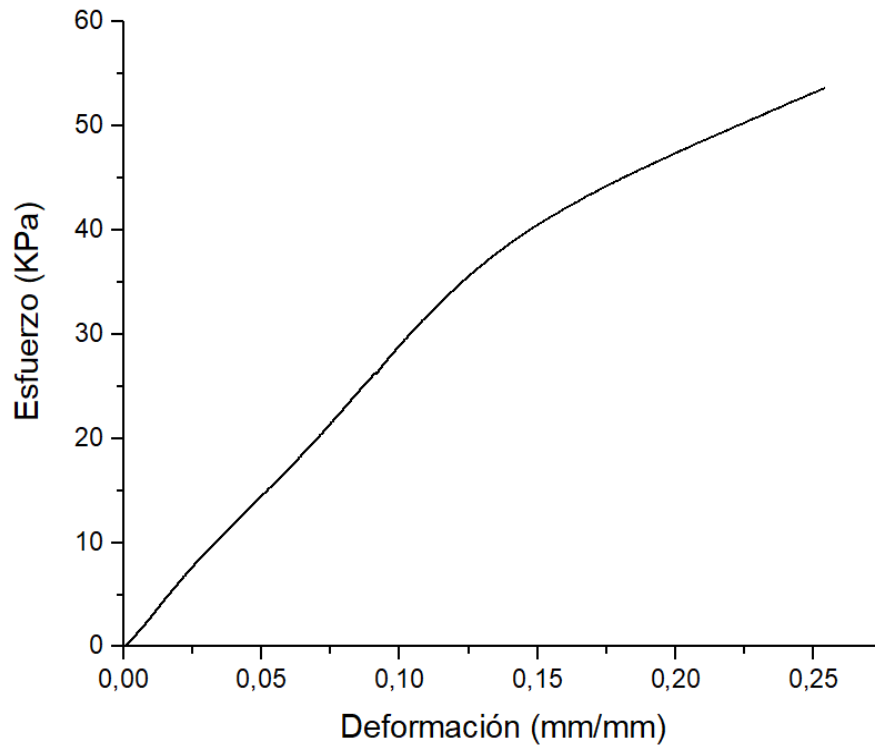


Figura 117. Prueba de compresión de poliestireno expandido (EPS) 10.



Cuadro 4. Pruebas de normalidad para ensayo de compresión

<b>Pruebas de normalidad</b>				
Tratamiento		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Esfuerzo de compresión	T16	0,891	10	0,173
	T50	0,885	10	0,149
	EPS	0,934	10	0,491

Cuadro 5. Prueba de homogeneidad de varianzas para ensayo de compresión

<b>Prueba de homogeneidad de varianzas</b>					
		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Esfuerzo de compresión	Se basa en la media	6,376	2	27	0,005
	Se basa en la mediana	5,080	2	27	0,013
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	5,080	2	14,646	0,021
	Se basa en la media recortada	6,352	2	27	0,005

Cuadro 6. Prueba de ANOVA para ensayo de compresión

<b>ANOVA</b>					
Esfuerzo de compresión					
	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	2120,189	2	1060,095	14,703	0,000
Dentro de grupos	1946,748	27	72,102		
Total	4066,938	29			

Cuadro 7. Prueba de normalidad para ensayo de flexión

<b>Pruebas de normalidad</b>				
Tratamiento		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Esfuerzo de flexión	T16	0,838	7	0,096
	T50	0,903	7	0,351
	EPS	0,952	7	0,751

Cuadro 8. Prueba de ANOVA para ensayo de flexión

<b>ANOVA</b>					
Esfuerzo de flexión					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	13717,335	2	6858,668	157,685	0,000
Dentro de grupos	782,927	18	43,496		
Total	14500,262	20			

Cuadro 9. Prueba de homogeneidad de varianzas para ensayo de flexión

<b>Prueba de homogeneidad de varianzas</b>					
		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Esfuerzo de flexión	Se basa en la media	4,449	2	18	0,027
	Se basa en la mediana	1,425	2	18	0,266
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	1,425	2	11,959	0,279
	Se basa en la media recortada	4,300	2	18	0,030