

**DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE LA FIBRA DE FIQUE Y EL AFRECHO
DE YUCA COMO MATERIA PRIMA PARA LA ELABORACIÓN DE UNA
MACETA BIODEGRADABLE**

DIEGO ANDRES ESPAÑA CARLOSAMA

DEPARTAMENTO DE AGROINDUSTRIA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

POPAYÁN

2023

**DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE LA FIBRA DE FIQUE Y EL AFRECHO
DE YUCA COMO MATERIA PRIMA PARA LA ELABORACIÓN DE UNA
MACETA BIODEGRADABLE**

DIEGO ANDRES ESPAÑA CARLOSAMA

**Trabajo de grado en la modalidad de investigación para optar por el título de
Ingeniero Agroindustrial.**

Directores

HÉCTOR SAMUEL VILLADA CASTILLO PhD.

ELSA SUSANA CAJIAO BUITRÓN M. Sc

DEPARTAMENTO DE AGROINDUSTRIA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

POPAYÁN

2023

Nota de aceptación

El director y los evaluadores han leído este documento, escucharon la sustentación del mismo y lo encontraron satisfactorio.

PH. D HÉCTOR SAMUEL VILLADA
CASTILLO
DIRECTOR

M. SC ELSA SUSANA CAJIAO
BUITRÓN
DIRECTORA



PH. D JHON EDISON NIETO
CALVACHE
JURADO

PH. D DIEGO FERNANDO ROA
ACOSTA
JURADO

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	9
1. MARCO REFERENCIAL	11
1.1 LOCALIZACIÓN	11
1.2 MARCO TEÓRICO	11
1.2.1 Afrecho de yuca	11
1.2.2 Fibra de fique	12
1.2.3 Materiales biocompuestos.....	13
1.2.4 Técnicas de procesamiento de materiales compuestos.....	13
1.2.5 Moldeo por compresión.....	14
1.2.6 Economía circular.....	14
1.3 MARCO HISTÓRICO.....	15
1.3.1 Residuos agroindustriales en la producción de materiales biocompuestos	15
1.3.2 Materiales compuestos reforzados con fibras naturales	15
2. METODOLOGÍA.....	17
2.1 FASE I: CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	17
2.1.1 Recepción y adecuación de materias primas.....	17
2.1.2 Propiedades térmicas por termogravimetría (TGA).....	19
2.1.3 Absorción de humedad en fibras.....	19
2.1.4 Distribución del tamaño de partícula	20
2.1.5 Determinación de la relación de aspecto	20
2.1.6 Cristalinidad relativa	21
2.1.7 Análisis por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)	22
2.1.8 Análisis estructural por microscopia electrónica de barrido (SEM)	22
2.1.9 Determinación de la resistencia a la tracción y módulo de Young	23
2.2 FASE II: PRUEBA DE MEZCLAS Y EVALUACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DEL MATERIAL.....	23
2.2.1 Diseño de mezclas.....	23

2.2.2	Elaboración de muestras mediante moldeo por compresión.....	24
2.2.3	Absorción de agua en material compuesto	26
2.2.4	Evaluación de las propiedades mecánicas de flexión	26
2.2.5	Propiedades térmicas a través de TGA.....	27
2.2.6	Análisis por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)	28
2.3	FASE III: MOLDEO DE MACETA BIODEGRADABLE Y EVALUACIÓN DE SU RESISTENCIA.....	28
2.3.1	Diseño y moldeo de la maceta biodegradable	28
2.3.2	Prueba de biodegradación	29
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
3.1	CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS.....	31
3.1.1	Absorción de agua en fibras de fique	31
3.1.2	Determinación de la resistencia a la tracción.....	31
3.1.3	Determinación del tamaño de partícula.....	32
3.1.4	Análisis de la relación de aspecto en fibras de fique.....	33
3.1.5	Análisis de las propiedades térmicas a través de TGA	34
3.1.6	Análisis por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier	36
3.1.7	Análisis estructural por microscopia electrónica de barrido (SEM)	40
3.1.8	Análisis de cristalinidad relativa	44
3.2	ANÁLISIS DE MEZCLAS Y SUS PROPIEDADES MECÁNICAS	46
3.2.1	Modelo de evaluación de datos.....	46
3.2.2	Propiedades mecánicas de flexión en el material biocompuesto	48
3.2.3	Absorción de agua en material compuesto	49
3.3	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO.....	51
3.3.1	Análisis por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) 51	
3.3.2	Análisis de las propiedades térmicas a través de TGA	52
3.3.3	Biodegradación del material compuesto	53
4.	CONCLUSIONES.....	55

5. RECOMENDACIONES56
BIBLIOGRAFÍA.....57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Afrecho de yuca	12
Figura 2. Proceso de extracción de fibra de fique (Furcraea Andina)	13
Figura 3. Adecuación de fibra de fique	17
Figura 4. Adecuación de afrecho de yuca	18
Figura 5. Analizador termogravimétrico	19
Figura 6. Tamizado fibra de fique	20
Figura 7. Sistema de observación MOAR	21
Figura 8. Difractómetro de rayos X	22
Figura 9. Espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier	22
Figura 10. Montaje prueba de tensión en fibras largas de fique	23
Figura 11. Gelatinización y mezcla de componentes	25
Figura 12. Moldeo por compresión	25
Figura 13. Absorción de agua en material compuesto	26
Figura 14. Prueba de flexión en material compuesto	27
Figura 15. Analizador termogravimétrico	27
Figura 16. Espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier	28
Figura 17. Moldeo de maceta biodegradable	29
Figura 18. Respirómetro Micro-Oxymax	30
Figura 19. TGA Fibra de Fique	35
Figura 20. TGA Afrecho de yuca.	36
Figura 21. FTIR Fibra natural de fique	37
Figura 22. FTIR Afrecho de yuca	39
Figura 23. Micrografías SEM en fibra de fique molida	40
Figura 24. SEM Fibra de sisal	41
Figura 25. SEM Fibra de yute	42
Figura 26. SEM Fibra de coco	42
Figura 27. Micrografías SEM de Afrecho de yuca	43
Figura 28. Espectro DRX para la fibra de fique	44
Figura 29. Espectro DRX para el Afrecho de yuca	46

Figura 30. Espectro FTIR del material compuesto	51
Figura 31. TGA Material compuesto	52
Figura 32. Biodegradación de material compuesto y celulosa microcristalina	54

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Límites mínimos y máximos de los componentes	24
TABLA 2. Diseño experimental de mezclas	24
TABLA 3. Porcentaje de absorción de agua en diferentes fibras naturales	31
TABLA 4. Propiedades mecánicas en fibras naturales.	32
TABLA 5. Fracciones de fibra retenida en el proceso de tamizado	33
TABLA 6. Relación de aspecto en fibras de fique molidas y tamizadas	34
TABLA 7. Porcentajes de Celulosa, Hemicelulosa y Lignina en algunas fibras naturales.	38
TABLA 8. Porcentajes de cristalinidad en otras fibras naturales.	45
TABLA 9. Propiedades mecánicas de las mezclas.	49
TABLA 10. Absorción de agua en material compuesto	50
TABLA 11. Análisis de varianza en las propiedades mecánicas y absorción de agua	47

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Caracterización de materias primas	65
Anexo B. Análisis de datos para el diseño de mezclas del material compuesto.	65
Anexo C. Prueba preliminar de germinación en campo	69

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental se ha convertido en uno de los principales ejes a tratar en todo el mundo, siendo los desechos plásticos sintéticos uno de los mayores problemas que afectan al planeta y sus ecosistemas cada día. En 2015, se generaron alrededor de 1.300 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos en todo el mundo y se espera que se duplique para el 2025, impulsado por la urbanización y el desarrollo socioeconómico en los países en desarrollo (Espino Penilla & Koot, 2020).

Actualmente, el 10% de los desechos generados en el mundo son plásticos y un bajo porcentaje se recicla. La mayoría de estos materiales han sido creados para usarse una sola vez y dejan su huella durante décadas. En Colombia, se estima que se consumen 24 kilos de plástico por persona al año y de esa cifra el 56% es de un solo uso, es decir, pitillos, cubiertos, platos, tapas y envases, entre otros utensilios (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

Por otro lado, existe un desaprovechamiento de muchas materias primas biodegradables que tienen potencial uso en la agroindustria no alimentaria, como lo son el afrecho de yuca y la fibra de fique. Estos materiales cuentan con un campo de aplicación actualmente reducido dentro de su cadena de valor y es posible alcanzar un potencial muy alto dentro de otros procesos agroindustriales que generan un mayor valor agregado, permitiendo un uso diversificado de estas materias primas (García Paternina et al., 2020; Gomez Ordoñez, 2020).

Hoy en día, el sector industrial y centros de investigación han planteado alternativas sostenibles con materias primas renovables, aplicadas dentro de una nueva estrategia de economía circular. De este modo se dio inicio al aprovechamiento de materiales agroindustriales que tiempo atrás han sido considerados como desechos, permitiendo el desarrollo de un nuevo ideal aplicado sobre estos residuos o a los cuales también se les puede llamar subproductos (Cecilia et al., 2019).

En Colombia a partir del 2018, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible introdujo la estrategia nacional de economía circular (ENEC), la cual plantea diferentes mecanismos de gestión y políticas públicas del Estado que facilitan la transformación hacia la economía circular. La presente propuesta se encuentra articulada a una de las líneas de acción en las que hace énfasis la ENEC que se denomina “flujos de materiales de envases y empaques”, la cual implica oportunidades a través de ecodiseño, que impulsa la innovación hacia envases y empaques de mayor eficiencia conservando su funcionalidad, y en el uso de materiales con menor impacto a través de todo su ciclo de vida (Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).

La Universidad del Cauca, a través del grupo de investigación denominado Ciencia y tecnología de Biomoléculas de interés Agroindustrial CYTBIA de la facultad de Ciencias Agrarias ha realizado diferentes procesos investigativos que involucran el aprovechamiento de materias primas biodegradables aplicadas en la producción de materiales amigables con el medio ambiente y con un potencial de aplicación en empaques para productos alimentarios y no alimentarios. Se han desarrollado productos plásticos flexibles a partir de almidón de yuca y plásticos semirrígidos a partir de harina de yuca, los cuales han sido evaluados con el fin de conocer sus propiedades funcionales (NAVIA P & VILLADA C, 2013; Villada Castillo 2023).

En este sentido se buscó evaluar el potencial de la fibra de fique y el afrecho de yuca como materia prima en la elaboración de una maceta biodegradable, mediante la caracterización de sus propiedades físicas, químicas y morfológicas; se determinó la mezcla con las mejores características de resistencia del material compuesto y se llevó a cabo la evaluación del material en pruebas de caracterización morfológica y biodegradación aplicada en condiciones de laboratorio simuladas.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 LOCALIZACIÓN

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

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 Afrecho de yuca

Es un material semisólido y fibroso generado en grandes volúmenes ya que representa hasta el 30% del peso de las raíces de yuca que entran al proceso de molienda (Figura 1). Es un subproducto generalmente considerado como desecho, económico y ampliamente disponible de la producción de almidón de yuca. Contiene aproximadamente un 50% de almidón junto con fibra en su mayoría y es una valiosa materia prima para diferentes bio-productos. Por cada 250-300 toneladas de raíz de yuca procesada, se producen unas 280 toneladas de afrecho con un 85% de humedad, no obstante, la mayor parte del afrecho de yuca se desecha (Martínez et al., 2018).

Los Departamentos de Córdoba y Sucre son catalogados como la zona principal de participación de yuca industrial, con una representación del 90% de producción a nivel nacional; el 10 % faltante está distribuido en los Departamentos de Cauca y Meta. En el norte del departamento del Cauca, existen alrededor de 210 empresas dedicadas a la producción de almidón de yuca, las cuales solo han dado importancia al almidón en su ciclo productivo, dejando de lado subproductos como el afrecho. Y teniendo en cuenta que la cantidad de afrecho generado en las plantas de extracción de almidón, independientemente de su nivel tecnológico es mayor en comparación a su producto principal el almidón de yuca, es necesaria la aplicación del modelo de economía circular que proporcione un manejo, desarrollo y adquisición de procesos y tecnologías que permitan convertir los subproductos del proceso de extracción de almidón de yuca en productos de alto valor y así contar con opciones de minimización, reutilización, y tratamientos de residuos (García Paternina et al., 2020).

Figura 1. Afrecho de yuca

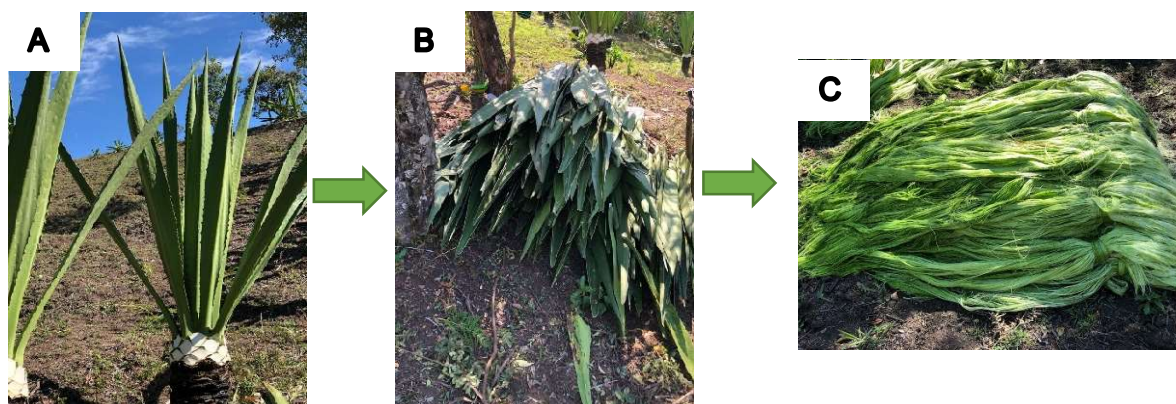


1.2.2 Fibra de fique

Las fibras de fique se extraen de la planta de Fique, también conocida como *Furcraea Andina*, es una planta nativa que se encuentra comúnmente en las regiones cercanas a la cadena montañosa de los Andes, y debido a la adaptabilidad de este cultivo, se extendió fácilmente a otras regiones de América del Sur. Las hojas de fique se cosechan para separar las fibras, que se refinan pasando por un proceso de secado (Figura 2), luego se hilan y se enhebran para fabricar típicamente telas, cuerdas y otras artesanías utilizadas principalmente en la agricultura. Colombia en particular, es el mayor productor de fibra de fique a nivel mundial, con casi 30.000 Toneladas por año. Además, el potencial de estas fibras y tejidos supera las aplicaciones mencionadas anteriormente, ganando importancia en el campo de los materiales compuestos, mostrando mucho interés en su uso como refuerzo para compuestos poliméricos en aplicaciones de alto rendimiento (Rua et al., 2021).

En Colombia las plantas de fique abarcan alrededor de 20 especies y algunas de ellas son utilizadas para extraer de sus hojas la fibra textil conocida coloquialmente, como cabuya. Específicamente la cadena productiva del fique en el Departamento del Cauca se centra en la producción de sacos, cordeles, bio-mantos y artesanías. Cerca de 11.000 familias campesinas e indígenas se ocupan de la siembra, cultivo y beneficio de esta penca del fique (Gómez Ordoñez, 2020).

Figura 2. Proceso de extracción de fibra de fique (*Furcraea Andina*)



A: Planta de fique B: Recolección de hojas C: Fibras de fique extraídas de las hojas

1.2.3 Materiales biocompuestos

Estos materiales están conformados de una resina polimérica que hace parte de la matriz y fibras naturales que actúan como refuerzo, permitiendo mejorar las propiedades mecánicas y térmicas de la resina sin fibra (Omrani et al., 2016).

Investigaciones de diferentes autores han demostrado la eficiencia de las fibras naturales para disminuir los tiempos de degradación de la resina polimérica cuando este ha cumplido su ciclo funcional y se somete a condiciones ambientales y procesos naturales de descomposición, lo que permite la reducción de la contaminación en el medio ambiente (Mora Espinosa et al., 2014). Así que, en los últimos años se han realizado algunos estudios para investigar la viabilidad de sustituir las fibras sintéticas convencionales por fibra natural en los materiales compuestos. Por ejemplo, el cáñamo, el sisal, el yute, el algodón, el lino y la retama son las fibras más utilizadas para reforzar polímeros como el polietileno, poliolefina, poliestireno y epoxi (Omrani et al., 2016).

Actualmente, las fibras naturales han sido utilizadas tanto en matrices termoestables como termoplásticas, teniendo en cuenta que su aplicación se deriva de acuerdo con las propiedades deseadas, la forma de procesamiento de la fibra y la disponibilidad de las fibras de acuerdo con la región (Rua et al., 2021)

1.2.4 Técnicas de procesamiento de materiales compuestos

Existe varios sistemas de procesamiento de materiales compuestos, uno de ellos es el procesamiento por extrusión que consta de un sistema continuo con la capacidad de transportar, mezclar, cortar y transformar materiales a medida que se procesan a través de él. Puede tener dos finalidades: primero, es un modo de conformar ciertas formas de manera continua, y, en segundo lugar, al procesar

polímeros que después utilizarán otros procesos, la extrusión proporciona un mezclador excelente para los aditivos (Ek & Ganjyal, 2020).

Por otro lado, existe el procesamiento por inyección donde los materiales calentados a temperaturas superiores a la de fusión, mediante una máquina de extrusión, son forzados a entrar en una matriz cerrada para producir una pieza. Finalmente, se cuenta con el proceso de termoformado, en el cual los materiales son calentados hasta la región plástica, pueden conformarse sobre un molde para producir productos tan diversos como empaques para huevo y paneles decorativos. El conformado puede efectuarse utilizando matrices, vacío o presión de aire (Gazga & Salazar, 2016).

1.2.5 Moldeo por compresión

Este tipo de moldeo se realiza mediante la colocación del material sólido en una matriz caliente. La aplicación de una alta presión a alta temperatura hace que el polímero se funda, llene la matriz y de inmediato inicie a formar un material rígido (Gazga & Salazar, 2016). Es la única técnica de manufactura de termoplásticos que se encuentra bien difundida en aplicaciones comerciales para la fabricación de partes estructurales y su costo de proceso, equipos y moldes necesarios es significativamente menor a el costo por otros métodos. Este tipo de moldeo posee la característica de generar pocos desperdicios del material y permite manejar altos contenidos y longitudes de fibras utilizadas como refuerzo, logrando así alcanzar mejores propiedades físicas y mecánicas (Moscoso, 2007).

Se ha estudiado el procesamiento de materiales biocompuestos a partir de polietileno reforzado con fibras de sisal y yute a través de moldeo por compresión en 2 tipos de técnicas que difieren en la existencia de un periodo de tiempo de espera antes de aplicar el moldeo, obteniendo diferencias en el espesor final de las muestras moldeadas (Senniangiri et al., 2022).

1.2.6 Economía circular

La Economía Circular es una estrategia innovadora de diseño, producción y creación de valor que beneficia a las empresas, la sociedad y el medio ambiente, reemplazando el esquema clásico de producción de la “economía lineal”. En la “economía lineal” se extraen recursos, se producen bienes, se consumen y al final se desechan. La economía circular busca optimizar el uso de insumos, incrementar la vida útil de los productos y al final; por medio de la recirculación de materiales, no desperdiciar nada y reutilizar todo. Con esto las empresas mitigan sus impactos ambientales, optimizan sus costos, generan nuevos ingresos e incrementan su rentabilidad. En Colombia, se ha observado una evolución de las políticas ambientales que han emergido en los últimos 30 años, las cuales han pasado de estar orientadas exclusivamente a la protección de los recursos naturales a

promulgar la sostenibilidad como un factor fundamental para aumentar la competitividad del país (Colombia Productiva, 2015).

La Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC) de Colombia es un ejemplo de los esfuerzos del país para avanzar hacia un modelo económico más sostenible y circular. La ENEC se enfoca en la identificación de iniciativas y modelos circulares que impulsan la productividad, sostenibilidad y equidad social, priorizando flujos de materiales industriales y de consumo masivo, envases y embalajes, agua, materiales de construcción, entre otros (DINORA & RAUFLLET; 2022).

1.3 MARCO HISTÓRICO

1.3.1 Residuos agroindustriales en la producción de materiales biocompuestos

En las últimas décadas, se ha generado el aprovechamiento de materias primas que anteriormente tenían una aplicación muy limitada, entre ellas se encuentran las fibras naturales que son una alternativa sostenible, amigable con el medio ambiente y económica (Versino & García, 2019). Los cultivos de fibras naturales se pueden clasificar como: primarios cuando el objetivo de su cultivo es la extracción de fibra, por ejemplo, el yute, el cáñamo, el sisal; y son secundarios cuando la fibra que producen hace parte de un subproducto, por ejemplo, la piña, la palma aceitera, el plátano, el cocotero (Faruk et al., 2012; Karimah et al., 2021). El uso de subproductos agroindustriales y del sector agrícola que poseen la funcionalidad de ser materiales de refuerzo o de relleno, dentro de la composición de un material compuesto, ha surgido como una alternativa que permite obtener nuevos materiales biodegradables, resistentes y sostenibles. Las investigaciones que se han realizado se enfocan tanto en la producción y desarrollo de nuevos productos, así como en nuevas tecnologías; para lograr obtener un valor agregado dentro de las cadenas de valor (Ita-Nagy et al., 2020; Versino & García, 2019).

1.3.2 Materiales compuestos reforzados con fibras naturales

Se han estudiado materiales biodegradables en la fabricación de macetas a base de yute y soja, con el fin de producir un compuesto mecánicamente fuerte. Se usó resina de soja con el fin de que cuando se prepare la mezcla, esta mejore su capacidad de acoplamiento con las fibras de yute y por consiguiente su resistencia. Se observó que las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y a la flexión) de los compuestos mejoran hasta un contenido de yute del 60% en peso, pero disminuyen con un mayor aumento del contenido de yute. Se obtuvo la mayor resistencia a la tracción de 48,8 y 45,2 MPa entre sus respectivos compuestos. Los análisis de pérdida de peso, FTIR, SEM y micrografías ópticas de compuestos después de la degradación del suelo mostraron que las macetas desarrolladas son completamente degradables por naturaleza (Behera et al., 2021).

Además, han sido estudiados los parámetros de procesamiento óptimos en materiales biocompuestos con fibras naturales, como la temperatura de moldeo, la presión y el tiempo de compresión, basándose en gran medida en estudios preliminares que tienen cuenta la composición química y los procesos físicos que ocurren en los materiales cuando son transformados o consolidados en una matriz compuesta. Así que fue posible obtener condiciones convenientes de temperatura/tiempo que varían entre 160 °C – 195°C para la temperatura y tiempos de entre 3 a 20 min, para brindar información acerca del proceso óptimo de fabricación de materiales biocompuestos por fibras naturales asegurando que se minimice la degradación de sus propiedades (Khanlou et al., 2017).

El grupo de investigación de la Universidad del Cauca denominado Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial CYTBIA, se ha enfocado a la investigación en el campo de los plásticos biodegradables, desarrollando propuestas encaminadas a la generación de productos obtenidos a partir de materias primas renovables y de bajo costo que puedan reemplazar los empaques tradicionales. Durante el año 2013, el grupo de investigación CYTBIA desarrolló dos proyectos financiados por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación – COLCIENCIAS. Uno de los proyectos se tituló “Consolidación de la oferta tecnológica de un prototipo de empaque semirrígido biodegradable a partir de harina de yuca y fibra de fique”; cuya ejecución permitió continuar con un proceso de investigación y articulación que consolidó la bandeja biodegradable en una oferta tecnológica mediante el ajuste de la metodología de obtención de esta y la reducción significativa en su peso (Villada Castillo et al., 2013).

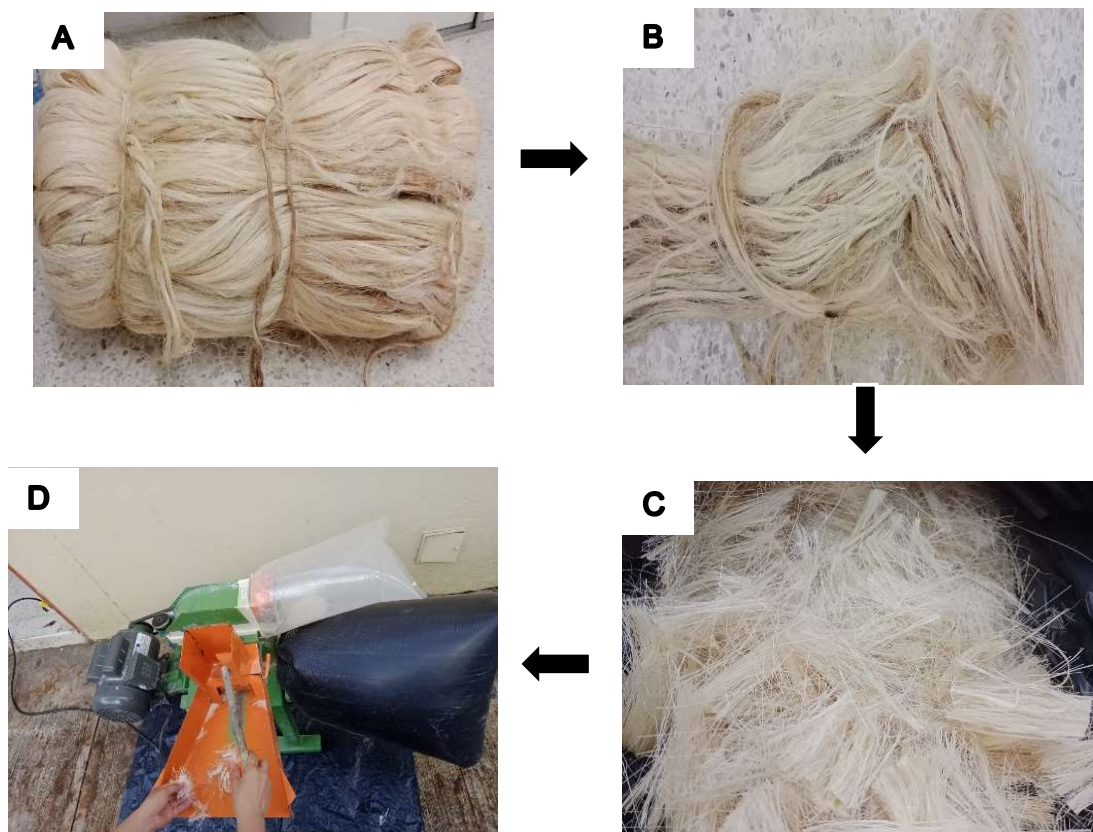
2. METODOLOGÍA

2.1 FASE I: CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

2.1.1 Recepción y adecuación de materias primas

La fibra de fique se obtuvo como fibra larga y seca a partir del procesamiento tradicional realizado por los productores del municipio de Paniquitá en el departamento del Cauca, luego se procedió a la reducción del tamaño de las fibras mediante cortes a una medida de entre 3 y 5 cm, con el fin de prepararlas para la etapa de molienda que se realizó en un molino de martillos (Penagos modelo TP 8) equipado con una criba de 1,35 mm, el cual redujo el tamaño de las fibras gracias golpes de martillos repetitivos, este proceso se realizó hasta obtener una consistencia y homogeneidad en la fibra (Figura 3).

Figura 3. Adecuación de fibra de fique

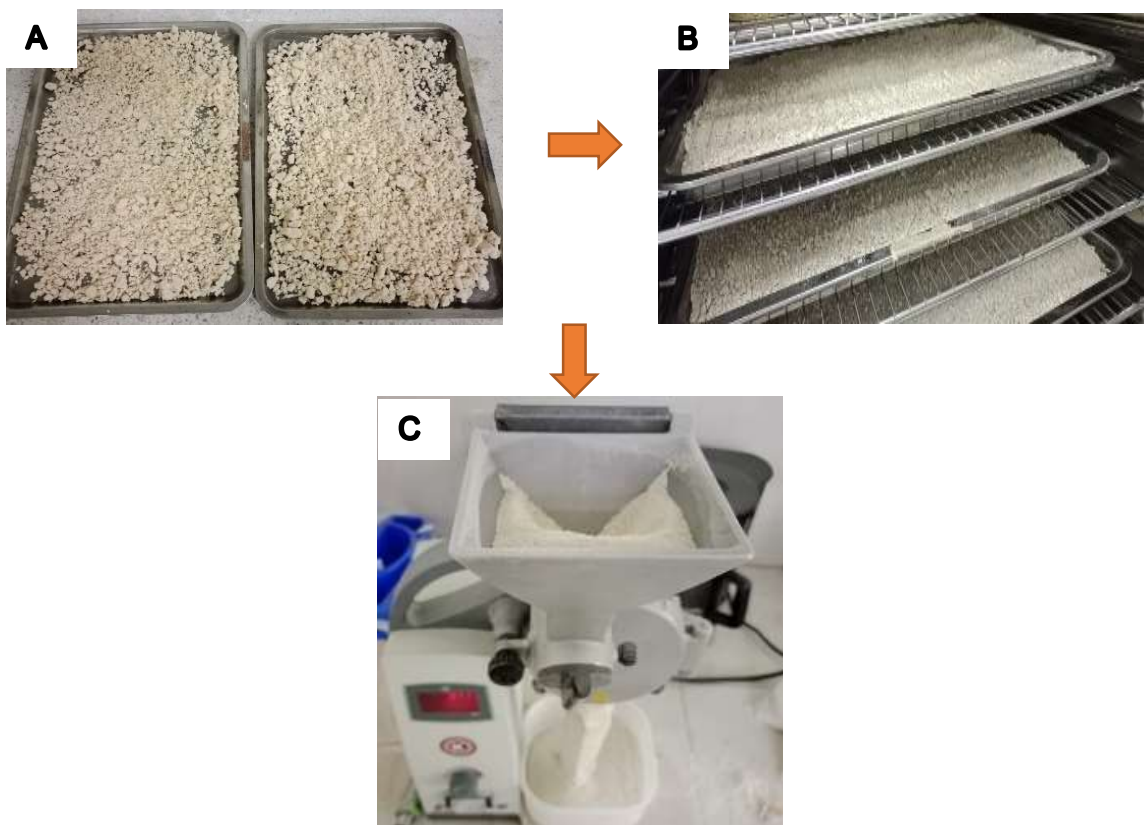


A: Rollo de fibra B: Fibras largas C: Reducción del tamaño de las fibras D: Molienda de la fibra

Por otro lado, se realizó la adecuación del afrecho de yuca proveniente del municipio de Mondomo en el departamento del Cauca, proporcionado por la empresa CAMAVI el cual llegó con un alto porcentaje de humedad (77,8%). Inicialmente se procedió a reducir la alta humedad con ayuda de un paño y presión manual, para posteriormente ser distribuido en bandejas y llevado a un horno de convección forzada (Blinder BF-56, Alemania) a una temperatura de 45 ± 3 °C hasta obtener una humedad del 10% al 12% (Radwag, Alemania), esto ocurrió 28 horas después de estar en el horno y se obtuvo un valor de humedad del 11,19%.

Luego, se realizó un proceso de molienda a través del molino de martillos (TP8, Penagos, Colombia) equipado con criba de 1,35 mm. Y finalmente, se volvió a realizar la molienda a través del molino de tipo analítico (POLYMIX® PX-MFC 90 D) pasando a través de todas las cribas con las que viene equipado y se obtuvo un material muy fino (FIGURA 4).

Figura 4. Adecuación de afrecho de yuca



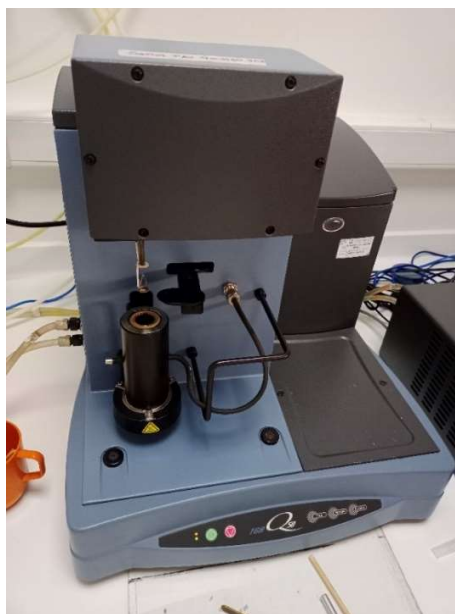
A: Afrecho de yuca húmedo B: Proceso de secado del afrecho C: Molienda de afrecho

El objetivo de esta adecuación inicial que compromete la reducción del tamaño de partícula de la fibra de fique y el afrecho de yuca, es conservar las características específicas de estas. La reducción del tamaño permite un mejor proceso de homogenización y mezcla con diferentes componentes y en este caso inicialmente permite un mejor proceso de gelatinización del afrecho de yuca y posteriormente una mezcla eficiente del gel con la fibra de fique, ya que, al aumentar la superficie que va a entrar en contacto se genera un acoplamiento más eficiente en la producción del material biocompuesto (Gazga & Salazar, 2016).

2.1.2 Propiedades térmicas por termogravimetría (TGA)

Se llevaron a cabo análisis termogravimétricos (TGA) de las muestras de fibra de fique y afrecho de yuca utilizando un analizador térmico (Figura 5) (TGA Q500, TA Instruments, EE. UU.). El proceso se realizó a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min en una atmósfera inerte de nitrógeno (N₂), abarcando un rango de temperatura de 25 a 600 °C. Además, se introdujo oxígeno en el rango de 600 °C a 800 °C para favorecer la oxidación del material (Solís Rosales et al., 2021).

Figura 5. Analizador termogravimétrico



2.1.3 Absorción de humedad en fibras

Se seleccionaron fibras secas de 70 mm de longitud, las cuales fueron secadas en un horno de convección forzada a una temperatura de 50 ± 3 °C durante 24 horas, luego se llevaron a un desecador hasta llegar a temperatura ambiente y así pesó en una balanza de tipo analítico y se continuo sumergiendo las fibras en agua destilada

durante 24 horas, finalmente se retiraron las fibras del agua y se secó el exceso de agua de su superficie para ser pesadas nuevamente, la determinación del porcentaje de absorción de humedad se obtendrá a través de la ecuación 1 (Moreno Montoya et al., 2011).

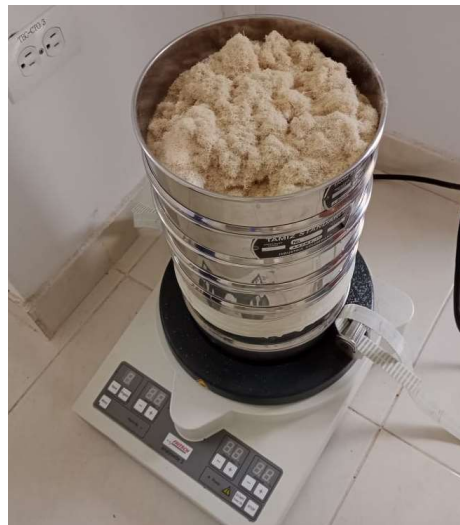
Ecuación 1:

$$\%Absorción = \frac{(W_i - W_s)}{W_i} \times 100$$

2.1.4 Distribución del tamaño de partícula

Esta prueba se realizó en muestras previamente molidas; a través de un proceso de tamizado con un juego de tamices No. 10, 25, 40, 50, 60, 70 y fondo, fabricados según la norma ASTM E-11 (Figura 6). La prueba se realizó por triplicado con muestras de 100 g en un sistema de tamizado eléctrico (Ro-Tap modelo TMZ), durante un tiempo de 5 minutos con intervalos de parada de 20 seg y una amplitud de 2,0 mm. Luego, se separó y pesó las cantidades retenidas en cada malla (Versino & García, 2014).

Figura 6. Tamizado fibra de fique

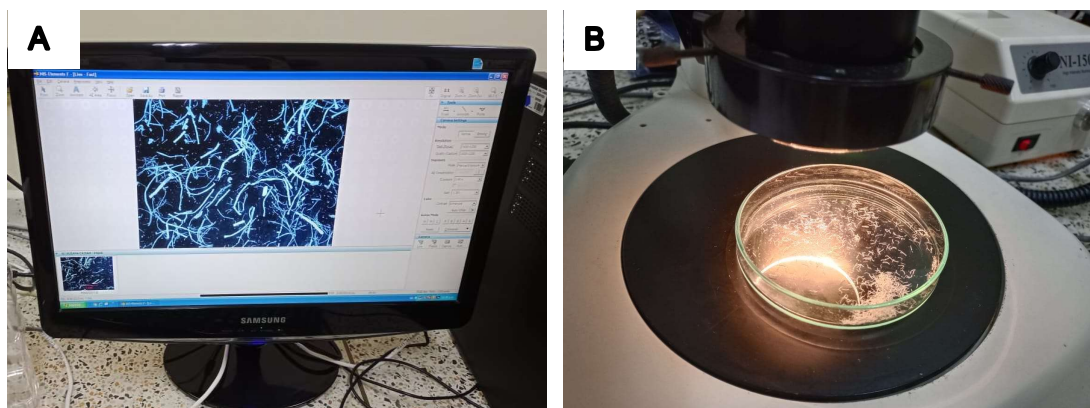


2.1.5 Determinación de la relación de aspecto

Se usó el método de microscopía óptica de alta resolución (MOAR) haciendo uso de un estereoscopio (Nikon Model C-DSS115) equipado con cámara digital (Nikon DS-2Mv 2Mp), se capturó imágenes de los productos obtenidos en el proceso de tamizado para las fibras (Figura 7). Se seleccionó 30 fibras de manera aleatoria para determinar su diámetro y longitud, se usó el programa ImageJ para determinar las

magnitudes de diámetro y longitud, para luego determinar la relación de aspecto calculando la longitud dividida por el diámetro.

Figura 7. Sistema de observación MOAR



A: Software de análisis de imágenes B: Estereoscopio con fibras de fique

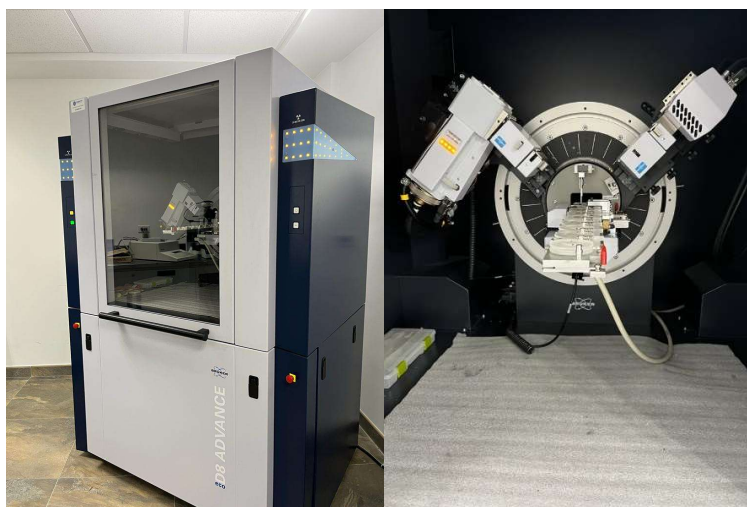
2.1.6 Cristalinidad relativa

Las muestras fueron analizadas a través de un difractómetro de rayos x (Bruker, Modelo D8 Advance) (Figura 8). Se usó una fuente de radiación Cu $\text{K}\alpha$ con longitud de onda de 1.540562 Å, una diferencia de potencial de 45 Kv y una densidad de corriente de 40 mA, con un paso angular de 0,02° y una velocidad de barrido de 5°/min. Se calculó la cristalinidad relativa a través de la relación entre la fase cristalina y el área total del difractograma, según la ecuación 2 (Rivas-González et al., 2008).

Ecuación 2:

$$\% \text{ cristalinidad} = \frac{\text{Área cristalina dispersada}}{\text{Área total dispersada}} \times 100$$

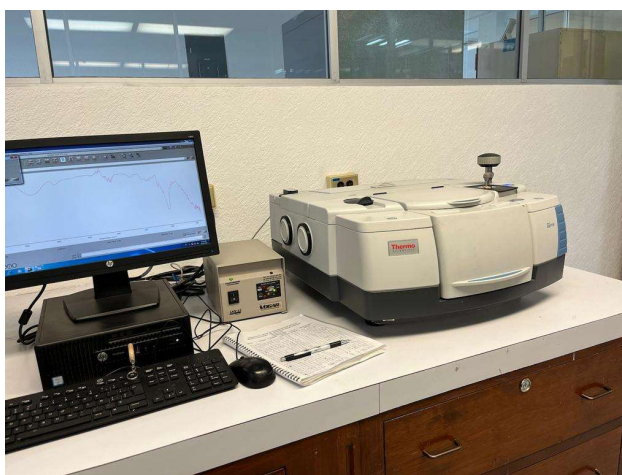
Figura 8. Difractómetro de rayos X



2.1.7 Análisis por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

Se realizó un acondicionamiento previo de las muestras con KBr (bromuro de potasio) y luego, se elaboró pastillas. El análisis se llevó a cabo en un espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier (IK-Fourier Shimadzu IRAffinity-1S) (Figura 9), aplicado sobre las pastillas previamente elaboradas. Se realizó barridos en un intervalo entre 4000 y 500 cm^{-1} .

Figura 9. Espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier



2.1.8 Análisis estructural por microscopia electrónica de barrido (SEM)

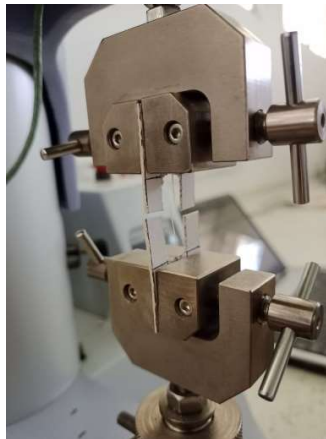
Se usó un microscopio electrónico de barrido (JSM-6490) con filamento de tungsteno operado a 20 kV a distintos niveles de magnificación. Previamente las

muestras fueron cubiertas con oro para mejorar la conductividad del material y se registraron micrografías a las muestras de afrecho de yuca y fibras de fique (Huszka & Gijs, 2019).

2.1.9 Determinación de la resistencia a la tracción y módulo de Young

Se llevó a cabo en una maquina Universal de Ensayos (Shimadzu, EZ-L, Japón), equipado con 2 mordazas y un software (Trapezium®). Las muestras fueron fibras largas de entre 65 mm y 75 mm, las cuales se montaron sobre un marco de cartón, según lo descrito en la norma ASTM C1557-20 (Figura 10).

Figura 10. Montaje prueba de tensión en fibras largas de fique



2.2 FASE II: PRUEBA DE MEZCLAS Y EVALUACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DEL MATERIAL

2.2.1 Diseño de mezclas

Se llevaron a cabo pruebas preliminares para determinar la proporción de los componentes principales de la mezcla, los cuales fueron afrecho de yuca gelatinizado, que se obtuvo a través de un proceso de gelatinización que implica la hidratación y la cocción del almidón presente en el afrecho, lo que resulta en la ruptura de las estructuras de la fibra y la liberación del almidón. Por otro lado, fibra de fique molida la cual paso por un proceso de molienda, fue incorporada al gel de afrecho de yuca para lograr una mezcla más homogénea. Estas pruebas preliminares evaluaron la cantidad máxima de fibra de fique y la cantidad mínima de gel de afrecho de yuca que permitieron generar una mezcla uniforme y completa, la Tabla 1 presenta los rangos considerados a través de la información obtenida por las pruebas preliminares con valores mínimos y máximos de prueba (Cajiao et al., 2016).

Tabla 1. Límites mínimos y máximos de los componentes

Componente	% Mínimo	% Máximo
Gel Afrecho de yuca	60	80
Fibra de fique	20	40

Se realizaron pruebas preliminares con el fin de determinar las condiciones de proceso que mejor se ajustaban a las diferentes mezclas, determinando así una temperatura de 160°C, una presión de 40 bares y un tiempo de moldeo de entre 120 a 150 segundos.

Para crear el diseño de mezclas se utilizó el programa Minitab 18 versión de prueba, las restricciones correspondientes fueron establecidas a través de estudios preliminares y se usó un modelo estadístico de segundo orden. El modelo estadístico obtuvo como resultado 5 tratamientos que corresponden a las mezclas de los dos componentes descritos en la Tabla 2 (Gutiérrez P & De la Vara S, 2012).

Tabla 2. Diseño experimental de mezclas

Tratamiento	Gel Afrecho de yuca	Fibra de fique
T1G60F40	60%	40%
T2G80F20	80%	20%
T3G70F30	70%	30%
T4G65F35	65%	35%
T5G75F25	75%	25%

2.2.2 Elaboración de muestras mediante moldeo por compresión

Inicialmente se determinó la humedad del afrecho de yuca en una balanza de humedad (Radwag, Alemania), luego se calculó las cantidades necesarias de afrecho de yuca molido y agua necesarios para realizar el proceso de gelatinización, después de 10 minutos se consiguió gelatinizar y se dejó enfriar el gel. Se pesó la cantidad necesario de gel y fibra de fique de acuerdo con cada tratamiento. Luego, se mezcló durante 10 minutos la fibra de fique y el gel en una mezcladora (Kitchen Aid clásica, K45SSOB, Estados Unidos) hasta obtener una masa homogénea de la fibra y el gel (Figura 11).

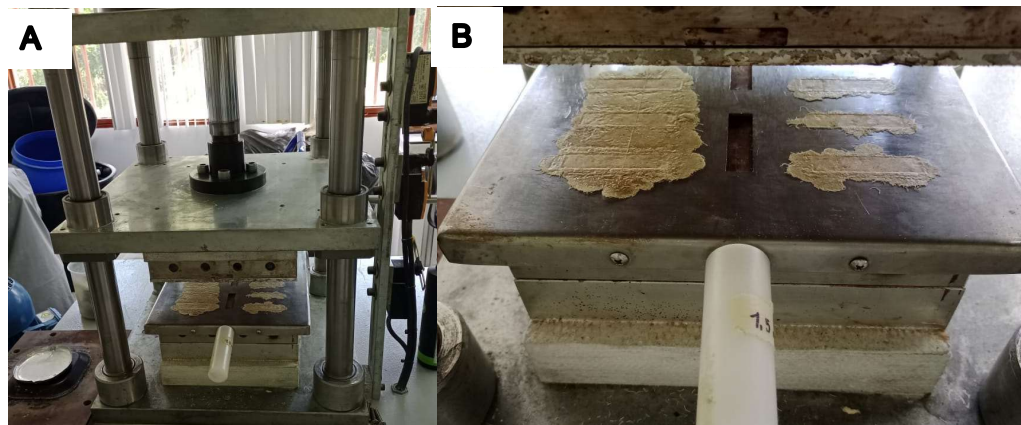
Figura 11. Gelatinización y mezcla de componentes



A: Mezcla de componentes para gelatinizar B: Gel de afrecho de yuca C: Mezcla de gel de afrecho de yuca y fibra de fique.

Se realizó el moldeo de las muestras en una máquina de moldeo por compresión (EDAFA, versión 01, Medellín – Colombia), que fue programada a una temperatura de 160 °C, una presión de 40 bares y un tiempo de moldeo de entre 120 a 150 segundos. Se usó un molde para probetas con un espesor de 1,5 mm y dividió la mezcla en pequeñas porciones de entre 2 a 3 gramos, luego cada porción se colocó dentro de la cavidad del molde y así se procedió a comprimir la mezcla (Figura 12).

Figura 12. Moldeo por compresión



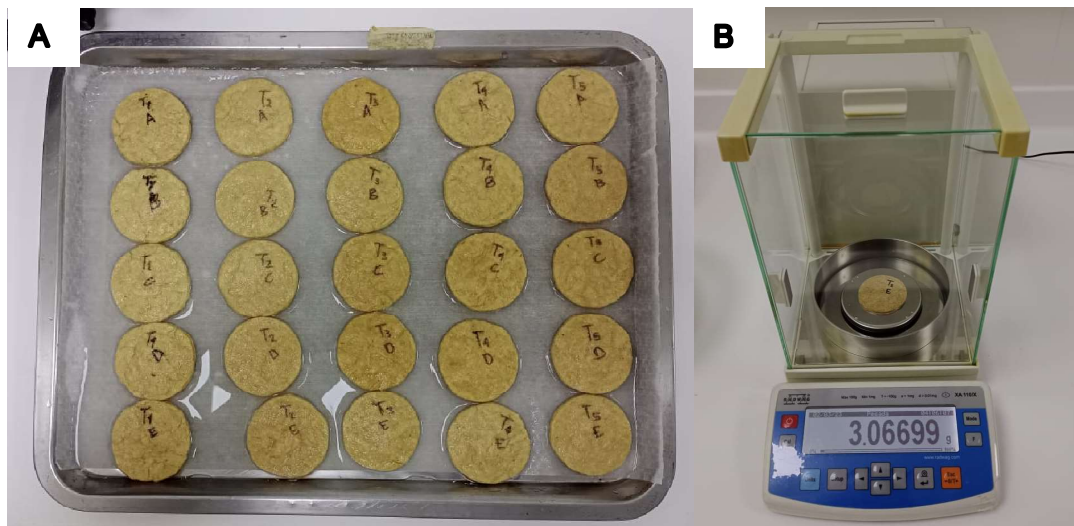
A: Máquina de moldeo por compresión B: Moldeo de probetas del material compuesto

Se obtuvieron 15 muestras para cada tratamiento, las cuales se acondicionó durante 8 días en una cámara climática (Binder BD, Alemania) programada con una humedad relativa de 50 ± 10 % y una temperatura de 23 ± 2 °C de acuerdo con la norma ASTM D618:08.

2.2.3 Absorción de agua en material compuesto

Se usó muestras en forma de disco de 50,8 mm de diámetro y 3,2 mm de espesor, que fueron moldeadas de acuerdo con el procedimiento ya descrito en el numeral 2.2.2. Las muestras fueron secadas a una temperatura de $50\pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, luego se registró el peso inicial y se sumergieron en agua destilada a $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 2 horas. A continuación, las muestras fueron retiradas del agua y se secó su superficie con un paño para eliminar el exceso de agua superficial y así registrar su peso nuevamente, según lo descrito en la norma ASTM D570. Además, se realizó un proceso de secado posterior con el fin de saber que cantidad de material soluble se retiró de la muestra (Figura 13).

Figura 13. Absorción de agua en material compuesto



A: Probetas en prueba de absorción de agua B: Medición del peso en probetas de absorción de agua

2.2.4 Evaluación de las propiedades mecánicas de flexión

El ensayo se llevó a cabo en una máquina universal de ensayos (EZ-L, Shimadzu, Japón), según lo descrito en la norma ASTM D 790. Cada muestra se apoyó sobre dos soportes ubicados bajo los extremos de la muestra (Figura 14). En seguida se aplicó una fuerza de flexión sobre el centro de la muestra hasta alcanzar su fractura. Se utilizó el software Trapezium® para obtener valores de respuesta y las respectivas gráficas.

Figura 14. Prueba de flexión en material compuesto



2.2.5 Propiedades térmicas a través de TGA

Se realizó la prueba de análisis de composición por termogravimetría según la norma ASTM E1131-08, se siguió la metodología descrita en la norma usando un analizador termogravimétrico (TGA Q50 V20.10) (Figura 15). En primer lugar, se tomó una muestra del material a analizar y se cortó en trozos pequeños hasta que cubriera el fondo de la capsula del equipo. Posteriormente, se colocó la muestra en la termobalanza y se sometió a un programa de calentamiento específico para este tipo de material compuesto por polímeros y fibras. Durante el análisis termogravimétrico, se midió la pérdida de peso de la muestra debido a la descomposición térmica de sus componentes. Finalmente, se interpretaron los datos obtenidos durante el análisis termogravimétrico para determinar la composición del material.

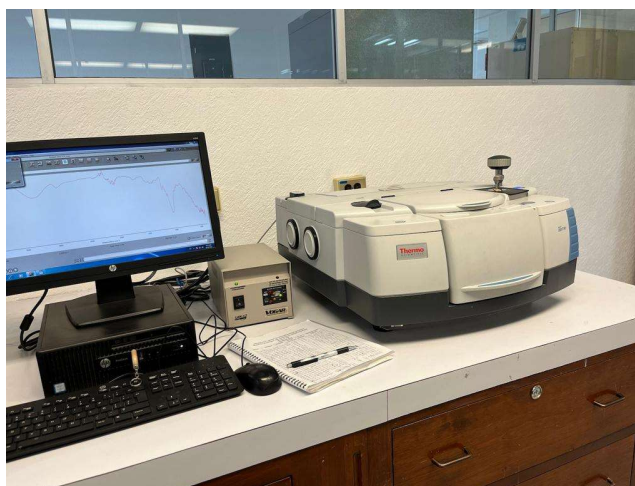
Figura 15. Analizador termogravimétrico



2.2.6 Análisis por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

Se realizó un acondicionamiento previo de la muestra con KBr (bromuro de potasio) y luego, se elaboró pastillas. El análisis se llevó a cabo en un espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier (IK-Fourier Shimadzu IRAffinity-1S) (Figura 16), aplicado sobre las pastillas previamente elaboradas. Se realizó barridos en un intervalo entre 4000 cm^{-1} y 500 cm^{-1} .

Figura 16. Espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier

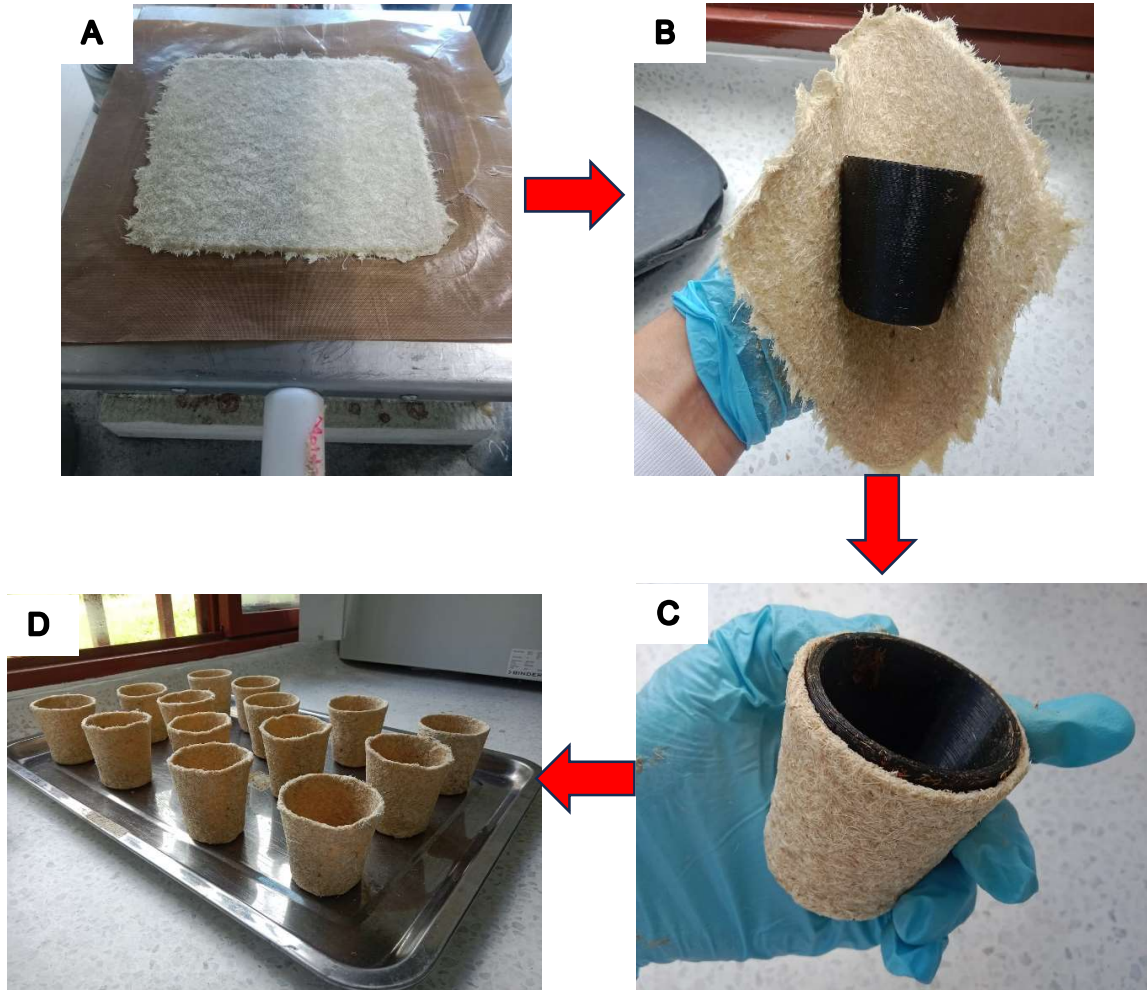


2.3 FASE III: MOLDEO DE MACETA BIODEGRADABLE Y EVALUACIÓN DE SU RESISTENCIA

2.3.1 Diseño y moldeo de la maceta biodegradable

La maceta biodegradable se diseñó para ser usada en la etapa inicial de un cultivo de pimentón (*Capsicum annuum*), se tomaron sus dimensiones según los requerimientos del cultivo consultados en investigaciones previas (Fuentes et al., 2021; Schettini et al., 2013; Dionisio et al., 2017), que llevara a la obtención de un molde base; se imprimió un molde base en material plástico con la ayuda de una impresora 3D. A partir de los resultados anteriormente obtenidos se elaboró la maceta biodegradable usando la formulación del mejor tratamiento de mezcla, siguiendo la metodología descrita en este documento en el numeral 2.2.2, el moldeo final se realizó manualmente, obteniendo inicialmente una lámina del material, luego con ayuda del molde base se dio forma a la maceta y se llevó a un proceso de secado durante 24 horas en un horno de convección forzada (Binder, Alemania) hasta obtener las macetas secas y con una pared dura (Figura 17).

Figura 17. Moldeo de maceta biodegradable



A: Moldeo de lámina B: Moldeo manual de la maceta con molde base C: Obtención de macetas D: Macetas secas

2.3.2 Prueba de biodegradación

Se realizó la prueba según los parámetros sugeridos por la norma ISO 14855-1 y la norma ASTM D5338, usando un equipo respirómetro (Micro-Oxymax, USA) (Figura 18), con reactores de vidrio de 2000 mL. Inicialmente se realizó un acondicionamiento del compost utilizado hasta las condiciones necesarias del proceso, con agua destilada se llevó el compost a 53,81% de sólidos totales y se mezcló en una mezcladora industrial (Marca, Colombia). Se pesó 240 g de compost en base seca o 519,6 g en base húmeda (balanza de precisión PCE-BM C, Alemania), luego se pesó 40 g de la muestra de estudio. En un recipiente plástico se mezcló homogéneamente y por separado, el compost con la muestra de estudio. Como material inerte se utilizó en cada tratamiento 716,6 g de arena en base

húmeda, con el fin de favorecer la porosidad de la mezcla y permitir la circulación del aire.

El biorreactor se llevó al equipo de biodegradación (Micro-Oxymax Respirometer, US), y se incubó a temperatura constante de $58^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ empleando un baño maría. Se estableció un flujo de aire continuo a una tasa de aproximadamente 250mL/min. Mediante un sensor de CO_2 propio del equipo Micro-Oxymax, con un rango de medición de 0-3%, se midió el CO_2 gaseoso acumulado en cada uno de los biorreactores. A partir del dióxido de carbono acumulado producido por las muestras de estudio se calculó el consumo de CO_2 usando la ecuación 3 y el porcentaje de biodegradación (Dt) con la ecuación 4 (Palechor Trochez, 2017).

Ecuación 3: Consumo de $\text{CO}_2 = Th_{\text{CO}_2} - [(\text{CO}_2)_T - (\text{CO}_2)_B]$

Ecuación 4:
$$Dt = \frac{(\text{CO}_2)_T - (\text{CO}_2)_B}{Th_{\text{CO}_2}} \times 100$$

Figura 18. Respirómetro Micro-Oxymax



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

3.1.1 Absorción de agua en fibras de fique

La absorción de agua en las fibras es un fenómeno de gran importancia, ya que puede afectar significativamente las propiedades físicas y mecánicas de los materiales lignocelulósicos (Faruk et al., 2012). En la presente investigación, las fibras de fique presentaron un valor de absorción de agua de $55,78 \pm 4,27$ %, un resultado muy similar a los datos reportados en la literatura, los cuales están por el orden del 60% (Delvasto et al., 2010).

La Tabla 3 muestra que las fibras naturales como el sisal, el yute y el coco tienen valores de absorción de agua más altos en comparación con las fibras de fique. A pesar de esto, estas materias primas también han sido objeto de estudio en numerosas investigaciones aplicadas a materiales compuestos (Nelva et al., 2016; Lopes et al., 2010; Mazón Ortiz, 2017). Aunque la alta absorción de agua puede afectar la estabilidad de un biocompuesto, muchos estudios han concluido que los materiales lignocelulósicos, como las fibras naturales, permiten obtener un alto grado de estabilidad y resistencia (Salvador et al., 2008). Esta comparación permite inferir que las fibras de fique podrían tener un menor riesgo de afectación en medios de alta humedad y lograr ser más resistentes en condiciones ambientales de la etapa inicial de un cultivo (Lopes et al., 2010; Nelva et al., 2016).

Tabla 3. Porcentaje de absorción de agua en diferentes fibras naturales

Fibras	Absorción de agua (%)	Referencia
Sisal	86	(Lopes et al., 2010)
Yute	62	(Nelva et al., 2016)
Coco	130-180	(Nelva et al., 2016)

3.1.2 Determinación de la resistencia a la tracción

La medición de las propiedades mecánicas de las fibras naturales de fique es importante para evaluar su calidad y su capacidad de refuerzo en materiales compuestos. Una de las pruebas mecánicas que se realiza es la prueba de tracción en fibras largas, la cual tiene como objetivo determinar la capacidad de refuerzo. Es importante tener en cuenta que, aunque se pueden utilizar tanto fibras largas como cortas en materiales compuestos, la prueba de tensión en fibras largas se enfoca en evaluar la capacidad de refuerzo que pueden llegar a tener estas fibras (Vargas Ortiz et al., 2021).

Las fibras de fique mostraron una resistencia a la tracción alta (298,645 MPa); valores muy semejantes a los reportados para otras fibras como la fibra de coco (220MPa) y la fibra de caña de azúcar (290MPa) (Arpitha & Yogesha, 2017). Esta propiedad de resistencia indica que estas fibras poseen un gran potencial para ser incluidas como refuerzos en matrices poliméricas.

En cuanto al módulo elástico y el porcentaje de deformación se registraron valores de 5,3 GPa y 11,47% respectivamente. Se encontraron semejanzas en el estudio de la fibra de Iraca que presentó un módulo elástico de 7,61 GPa y un porcentaje de deformación del 10,33% (Mora-Espinosa & Ramón-Valencia, 2017).

Tabla 4. Propiedades mecánicas en fibras naturales.

Fibra Natural	M. Elástico (GPa)	Deformación (%)	Fuerza (MPa)	Referencia
Fique	5,3	11,47	298,645	Experimental
Sisal	9,4 – 22	2 - 2,5	511 – 635	(Mazón Ortiz, 2017)
Jute	26,5	1,5 -1,8	393 – 773	
Coco	4 – 6	15 - 30	175 – 220	

La resistencia a la tracción es una medida importante de la capacidad de la fibra para soportar fuerzas de tracción antes de romperse (Kim & Netravali, 2010). De acuerdo con investigaciones reportadas en la literatura, se pudo establecer que las fibras de fique presentaron valores de resistencia a la tensión semejantes a los datos reportados para las fibras de sisal e inclusive aparentemente superiores a valores alcanzados en fibras de jute y coco, la diferencia entre estas fibras se puede apreciar en la tabla 4 (Mazón Ortiz, 2017).

El módulo de Young es una medida de la rigidez de la fibra, y se encontró que la fibra de jute presenta el valor más alto, seguida de la fibra de sisal, luego se ubica la fibra de fique y finalmente la fibra de coco con el valor más bajo (Tabla 4).

La deformación es otra propiedad importante que considerar en la selección de la fibra para la fabricación de macetas biodegradables, ya que una mayor deformación puede indicar una mayor capacidad de absorción de impactos y fuerzas de compresión. Se encontró que la fibra de coco presentó la mayor deformación, con un rango entre el 15% -30%, seguida de la fibra de fique con 11,47%, la fibra de sisal con un 2% – 2,5% y la fibra de jute con 1,5% - 1,8%.

3.1.3 Determinación del tamaño de partícula

El tamaño de partícula de los materiales de relleno o refuerzo que se utilizan en matrices poliméricas es una característica importante que determina su calidad y su idoneidad para su uso en la industria (Subramanian Senthilkannan, 2019).

Los resultados indicaron que la longitud de las fibras osciló entre un valor mínimo de 0,24 mm y un valor máximo de 2,31 mm, mientras que el diámetro de estas varió desde un valor mínimo de 20,42 μm hasta un valor máximo de 80,38 μm . La utilización de fibras cortas en la formación de materiales compuestos aumenta el área superficial en contacto con la matriz polimérica, lo que contribuye a mejorar su resistencia (Mora Espinosa et al., 2014). Se ha usado fibras cortas de coco con una longitud de entre 5 y 10 mm, incorporándolas como refuerzo en polipropileno para la formación del material compuesto (Kumar et al., 2021).

Por otro lado, el proceso de tamizado permitió obtener los porcentajes de fibras retenidas en cada malla, los cuales se detallan en la Tabla 5. En los cuatro tamices iniciales (10, 25, 40 y 50), se retuvo un 64,63% de las fibras, lo que corresponde a más de la mitad del total, con tamaños de partícula entre 0,3 y 2 mm de longitud. Por su parte, los dos tamices restantes (60 y 70) y el fondo presentaron un 35,48% de fibra retenida, con tamaños de partícula entre 0,25 mm y valores inferiores a 0,212 mm de longitud.

Tabla 5. Fracciones de fibra retenida en el proceso de tamizado

Tamiz N°	Retenido (%)	Desviación
10 (2mm)	8,78	$\pm 1,32$
25 (0,71mm)	18,49	$\pm 1,12$
40 (0,425mm)	22,35	$\pm 1,03$
50 (0,3mm)	15,01	$\pm 0,30$
60 (0,25mm)	13,59	$\pm 0,74$
70 (0,212mm)	7,08	$\pm 0,96$
Fondo ($X < 0,212\text{mm}$)	14,81	$\pm 0,55$

3.1.4 Análisis de la relación de aspecto en fibras de fique

La relación de aspecto en fibras cortas de fique se refiere a la relación entre la longitud y el diámetro de las fibras. Las relaciones inferiores a 10 son catalogadas como fibras de relleno, entre 10 y 50 se clasifican como un refuerzo moderado y con valores mayores a 50 se definen como un refuerzo de alto grado (Faruk et al., 2012; Navia P. et al., 2013).

El análisis de datos presentado en la Tabla 6, arrojó valores entre 10 y 50 para la relación de aspecto, lo que significa que estas fibras proporcionan un refuerzo moderado a los materiales compuestos en los que se deseen utilizar. Esto es importante tenerlo en cuenta en la fabricación de materiales compuestos, ya que la

relación de aspecto de las fibras influye significativamente en las propiedades mecánicas del producto final (Montufar M & Remache C, 2021).

Este resultado es importante porque indica que la inclusión de fibras naturales en la fabricación de materiales compuestos no solo tiene beneficios económicos, sino que contribuye a mejorar las propiedades mecánicas del material. Las fibras naturales son una alternativa sostenible y renovable a las fibras sintéticas, y su inclusión en la fabricación de materiales compuestos puede incrementar la resistencia, la rigidez y la durabilidad del material (Gazga & Salazar, 2016).

Tabla 6. Relación de aspecto en fibras de fique molidas y tamizadas

Tamiz	Abertura (ASTM E-11)	L/D (Promedio)	Desviación
Malla 10	2 mm	23,405	±8,748
Malla 25	710 µm	19,963	±6,759
Malla 40	425 µm	17,625	±6,124
Malla 50	300 µm	15,166	±6,165
Malla 60	250 µm	13,821	±5,051
Malla 70	212 µm	15,343	±4,376
Fondos	-	15,903	±6,799

Otros estudios evaluaron la influencia del tamaño de partícula de las fibras de sisal en las propiedades de resistencia de un material compuesto, se usaron fibras cortas desde 2,1 hasta 9,2 mm, se encontró un aumento de la resistencia desde 2,1 hasta 5,8 mm y luego de este valor hasta 9,1 se indicó una reducción de la resistencia, atribuyendo este fenómeno al doblado y rizado de las fibras más largas en el moldeo (Zárate et al., 2003).

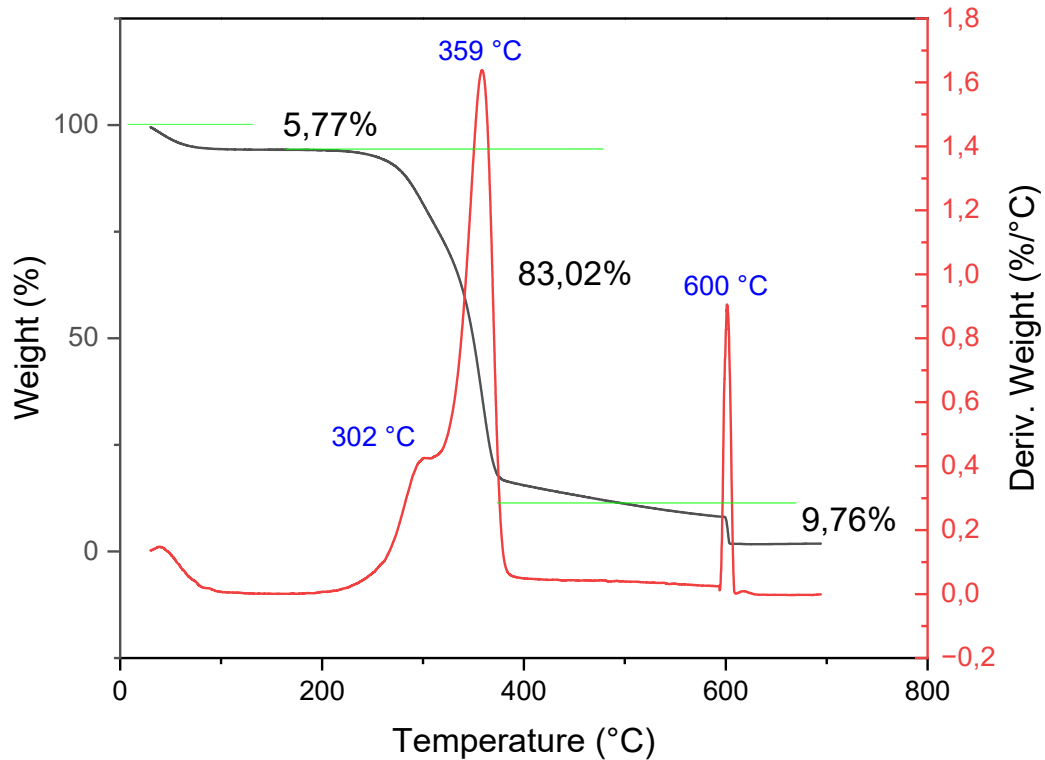
3.1.5 Análisis de las propiedades térmicas a través de TGA

El análisis de la estabilidad térmica y la composición de la fibra natural de fique mediante técnicas de análisis térmico, como la termogravimetría (TGA), es esencial para comprender sus propiedades térmicas y su comportamiento en diferentes procesos. En este contexto, el análisis de un termograma TGA para fibra natural de fique puede proporcionar información valiosa sobre su estabilidad térmica, contenido de humedad, presencia de componentes orgánicos, entre otros factores (Salvador et al., 2008).

En el análisis TGA realizado en la fibra de fique, inicialmente se observa una pérdida de peso alrededor de los 100 °C, pico que corresponde a la evaporación del agua presente en la fibra. Su descomposición inicia sobre los 225 °C eliminando primero la porción de hemicelulosa, luego alrededor de los 359 °C se reduce la porción de celulosa y finalmente a la altura de los 600 °C se elimina la lignina que es el

componente más difícil de degradar. En cuanto a la reducción del peso, en primer lugar, se evidencia una reducción del 5,77% correspondiente al agua evaporada, luego un 83,02% que corresponde a celulosa y hemicelulosa y finalmente un 9,76% asignado a la lignina (Figura 19). Estos resultados son semejantes a los reportados por Gómez Hoyos et al., (2012).

Figura 19. TGA Fibra de Fique

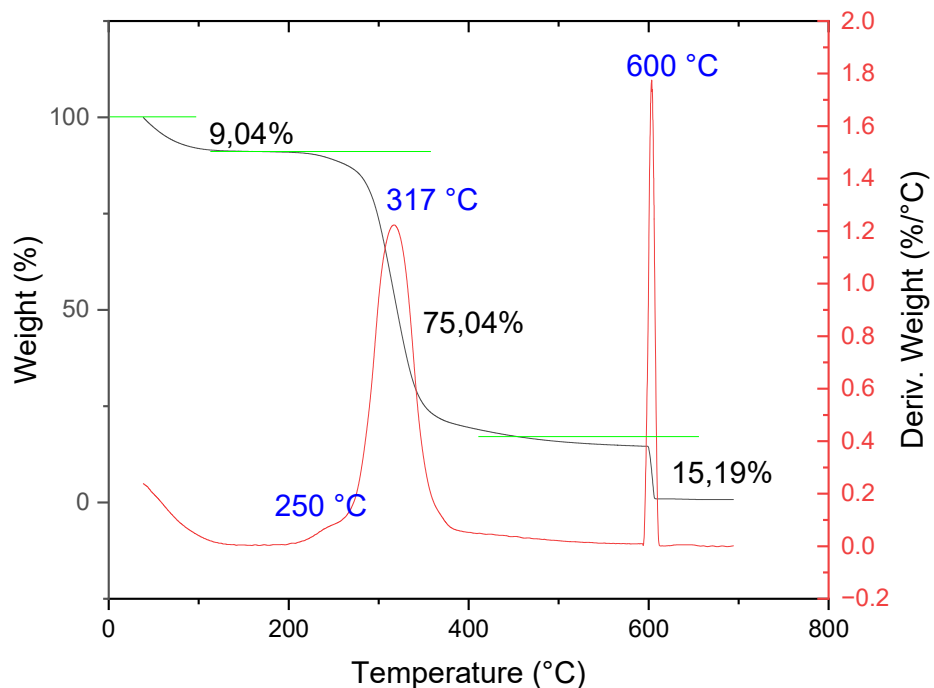


El termograma para el afrecho de yuca (Figura 20) indica los porcentajes de pérdida de peso y las temperaturas de degradación del almidón y el material fibroso presentes en esta materia prima. Inicialmente, se observa una reducción del peso con un 9,04% que es asignado a la evaporación del agua, y esto ocurre alrededor de los 100 °C. Esta etapa se conoce como desorción de humedad y es común en muchos productos agrícolas debido a la presencia de agua libre en su composición (González et al., 2015).

Posteriormente, se indica una gran reducción en el peso correspondiente a un 75,04% en un rango de temperaturas entre los 200°C y 400°C (Sánchez et al., 2020). Esta etapa indica una degradación térmica más intensa y se relaciona con la descomposición del almidón de yuca, ya que los polisacáridos tienden a degradarse en ese rango de temperaturas. Debido a la gran cantidad de almidón presente en el afrecho, hay una alta pérdida en el porcentaje de peso durante esta etapa (Martínez et al., 2019).

Finalmente, los componentes fibrosos, que son los más resistentes, se degradan alrededor de los 600°C y la pérdida de peso es de un 15,19%, eliminando casi por completo esta materia prima. La degradación de los componentes fibrosos se debe a la ruptura de las cadenas poliméricas de celulosa y hemicelulosa presentes en el afrecho de yuca (Santos et al., 2018).

Figura 20. TGA Afrecho de yuca.



3.1.6 Análisis por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier

La fibra de fique al igual que otras materias primas vegetales está compuesta por lignina, hemicelulosa y celulosa con un porcentaje composicional de 23.9%, 23.8% y 52.3% respectivamente, además posee pectinas y ceras (Ovalle Serrano et al., 2017).

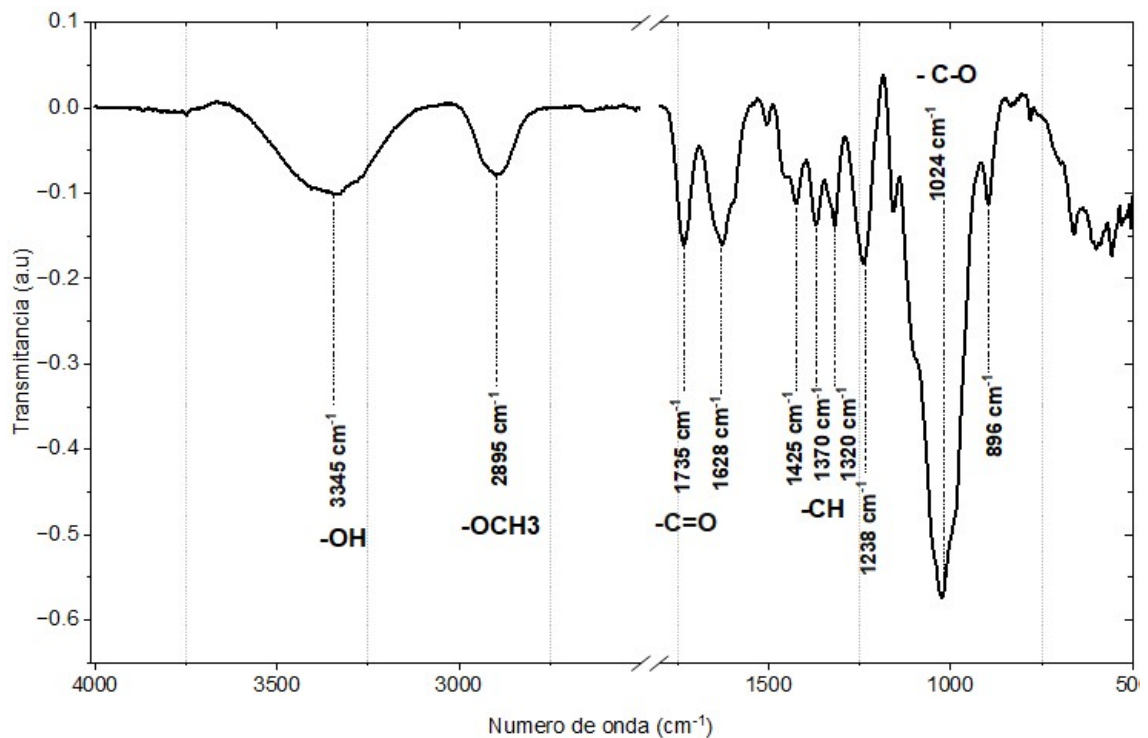
El espectro IR de la fibra de fique natural (Figura 21) proveniente del Municipio Paniquita en el departamento del Cauca, se identificó con una banda de absorción de 3345 cm^{-1} , la cual presenta una deformación del enlace OH (hidroxilo) perteneciente al grupo de los polisacáridos en fibras naturales (Benini. K, 2011) y se confirma la presencia de lignina con un pico de absorción de 2895 cm^{-1} que representa su grupo OCH₃.

Adicionalmente en 1425 cm^{-1} y 1370 cm^{-1} se identifica bandas de absorción correspondientes al enlace CH con deformación asimétrica y simétrica respectivamente, las cuales pertenecen a la estructura de la celulosa y se puede apreciar en 1320 cm^{-1} otro enlace CH que se atribuye a la estructura de la lignina (Mina, 2012). Se observa una banda de absorción importante en 1735 cm^{-1} que se relaciona con el estiramiento del enlace carbonilo C=O asociado a uniones de tipo éster que comúnmente se presentan en la estructura de la hemicelulosa (Mina, 2012).

Finalmente aparece la banda más grande y con una intensidad alta en 1024 cm^{-1} , al cual se le asigna enlaces C-O pertenecientes a alcoholes y en el caso de fibras relacionado con la presencia de celulosa (Guedes & Mulinari, 2014).

Estudios previos realizados en diferentes fibras naturales presentan similitudes con la fibra de fique en cuanto a las bandas presentadas en el espectro, uno de estos estudió la caracterización química de la fibra de coco (*Cocos nucifera* L.) asignando las vibraciones a enlaces que confirmaron la presencia de celulosa, hemicelulosa y lignina en la fibra (Hernández Vidal et al., 2018).

Figura 21. FTIR Fibra natural de fique



Otras fibras naturales como sisal, yute y coco presentan una composición similar a las fibras de fique, ya que poseen cantidades considerables de celulosa,

hemicelulosa y lignina (Tabla 7). Las bandas de absorción presentes en los espectros de todas estas fibras son similares, en estas se identifican los mismos componentes, la diferencia radica en la intensidad de la banda que se presenta los porcentajes de cada componente (Celulosa, Hemicelulosa y Lignina) difieren entre sí y así mismo la banda aumenta o disminuye (Suárez Castañeda et al., 2017).

Tabla 7. Porcentajes de Celulosa, Hemicelulosa y Lignina en algunas fibras naturales.

Fibras naturales	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Referencias
Fique	52,3	23,8	23,9	(Ovalle Serrano et al., 2017)
Sisal	78	10	8	(Omrani et al., 2016)
Coco	32,3	-	42,5	(Nelva et al., 2016)
Yute	61-71.5	17,9-22,4	12-13	(Omrani et al., 2016)

Por otro lado, el afrecho de yuca se compone principalmente por fibra expresada comúnmente como celulosa y un alto contenido de almidón residual que es retenido por la fibra que absorbe grandes cantidades de agua, generalmente este almidón en su forma nativa contiene aproximadamente 20% de amilosa y 80% de amilopectina (Salcedo et al., 2017).

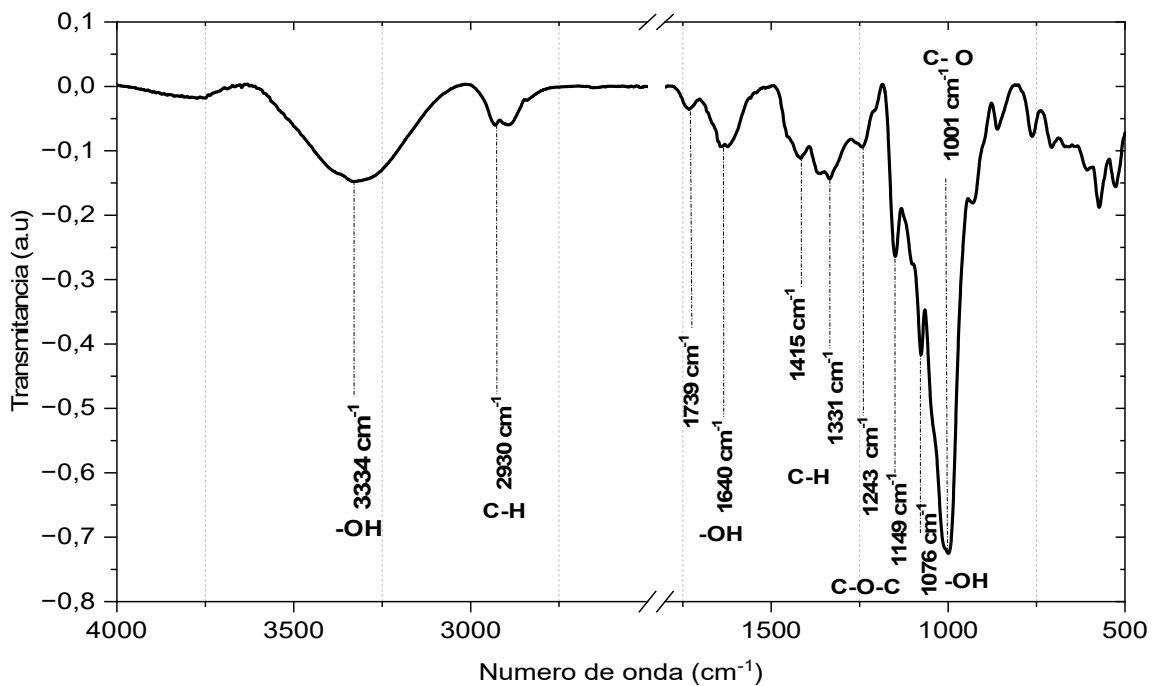
El espectro del afrecho de yuca (Figura 22) proveniente del Municipio de Caldon en el departamento del Cauca presenta una vibración de tensión de los enlaces OH alrededor de 3334 cm^{-1} lo cual indica la presencia de hidrógenos intermoleculares. En la banda de absorción de 2930 cm^{-1} se observó vibraciones de extensión C-H. Se puede apreciar una banda de flexión del OH del agua a 1640 cm^{-1} , lo que indica que el polímero presente en el afrecho de yuca es higroscópico (Ruiz, 2006). El espectro del afrecho de yuca presenta similitudes con los espectros de las fibras naturales debido a la considerable cantidad de fibra que lo compone, se puede apreciar picos que identifican a la celulosa como uno de los componentes (Daza Orsini & Parra, 2021; Salvador et al., 2008).

Además, se observa tres bandas importantes en 1149 cm^{-1} , 1076 cm^{-1} y 1001 cm^{-1} que representan enlaces de tensión C-O-C, flexión del OH e interacciones C-O respectivamente, estas bandas son características de los polisacáridos y se les asigna interacciones con diferente ambiente químico (C-O-C, CH_2OH y COH), pertenecientes a la amilosa y la amilopectina (Rivera Cano, 2012; Ruiz, 2006).

Estudios previos realizados en harina de yuca permiten comparar las bandas de absorción con el afrecho de yuca confirmando la presencia de almidón en las bandas del espectro asignadas a los enlaces pertenecientes a la estructura de la amilosa y amilopectina; y de igual forma presentando los enlaces propios de la estructura de la celulosa presente en la fibra que poseen las dos materias primas (Rivera Cano, 2012).

Cabe destacar que la harina de yuca y el afrecho de yuca poseen los mismos componentes (Fibra y almidón) pero con diferencia en el porcentaje de estos dentro de la materia prima, debido a que el afrecho de yuca es un subproducto al cual se le ha retirado gran parte de almidón y la composición de este material está indicada en el Anexo A realizado a través de un análisis proximal (García Paternina et al., 2020).

Figura 22. FTIR Afrecho de yuca



La selección de la matriz de unión adecuada es crucial para lograr una buena adhesión entre las fibras y la matriz, lo que a su vez mejora la resistencia mecánica del material compuesto. La matriz de unión también puede influir en las propiedades de biodegradabilidad del material compuesto, lo que es importante para su eventual descomposición en el medio ambiente. Por lo tanto, la elección de la matriz de unión es un factor clave para la producción de materiales compuestos biodegradables y sostenibles (Montufar M & Remache C, 2021).

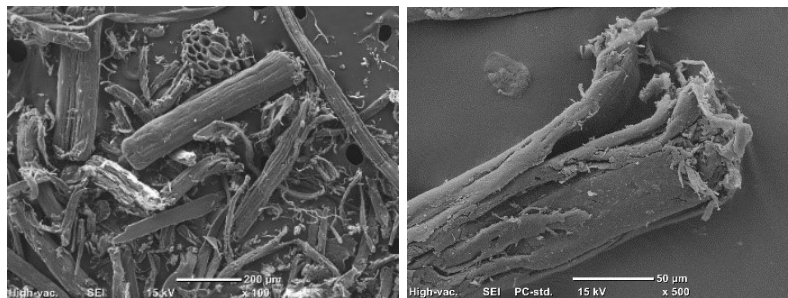
Por otro lado, la composición de estas matrices difiere de acuerdo a su origen y el proceso de obtención al cual han sido sometidos, así que, su espectro FTIR presenta variación en la intensidad de las bandas que caracterizan a las materias primas compuestas por almidón (Harina de trigo, Harina de maíz y Afrecho de yuca) (Daza Orsini & Parra Aparicio, 2021; Fernández de Almeida et al., 2012).

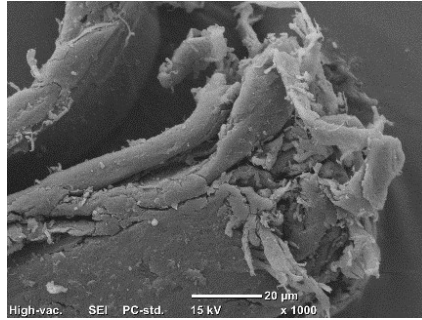
3.1.7 Análisis estructural por microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las fibras vegetales están constituidas por fibras de celulosa y unidas entre sí por una matriz de lignina amorfa; cada fibra consta de una estructura compleja en capas que posee una pared primaria y en su interior una serie de microfibrillas celulares enrolladas helicoidalmente formadas a partir de moléculas de celulosa de cadena larga (Kalia et al., 2011).

Se obtuvieron micrografías por el método SEM (Figura 23) permitiendo observar la estructura filamentosa de la fibra de fique molida, se aprecia gran variabilidad de estructuras dentro de la muestra de fique debido al proceso de molienda realizado a las fibras largas, se observan superficies ásperas, agrietadas, divididas y con terminaciones que presentan gran destrucción en la estructura de la fibra. Se logra observar la estructura porosa y fibrilar en fibras de diferentes tamaños (finas y gruesas) y formas. El estado en el que se encuentra esta fibra ofrece una mayor área superficial, lo que es ventajoso para su uso en la fabricación de materiales de alta resistencia. Además, la presencia de poros y hendiduras mejora su capacidad de absorción y retención de agua, lo que podría poner en riesgo la resistencia del material (Gómez Hoyos et al., 2012; Mora Espinosa et al., 2014).

Figura 23. Micrografías SEM en fibra de fique molida

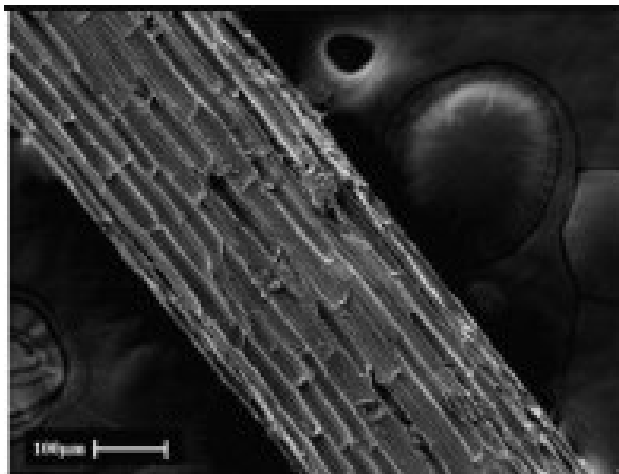




A: Fibra de fique molida 100x (200μm) B: Fibra de fique molida 50x (50μm) C: Fibra de fique molida 1000x (20μm)

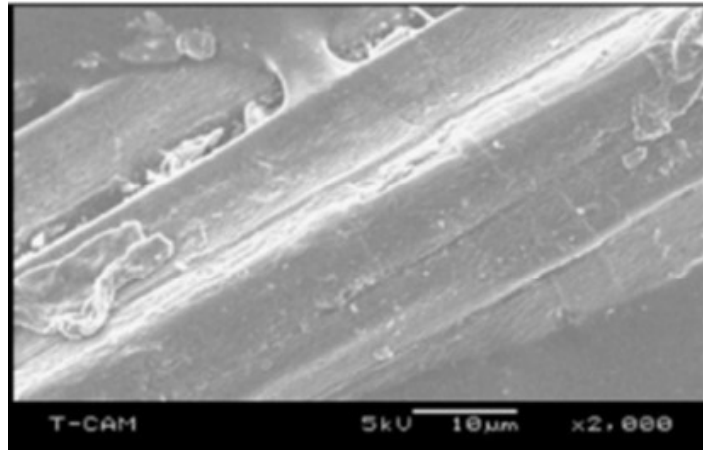
Otras fibras naturales como el sisal, coco y jute presentan diferencias en cuanto a la morfología, estructura y tamaño observados a través de micrografías. Las fibras de sisal (Figura 24) tienen una superficie más lisa y uniforme, que aparece formada por numerosas capas apretadas que se superponen (Kim & Netravali, 2010b; Lopes et al., 2010). Las fibras de coco (Figura 26) también tienen una superficie porosa, con muchas irregularidades y protuberancias, que aparecen como hendiduras en la superficie (Asasutjarit et al., 2009). Las fibras de jute (Figura 25), por su parte, tienen una superficie rugosa y con pocas irregularidades (Singh et al., 2018).

Figura 24. SEM Fibra de sisal



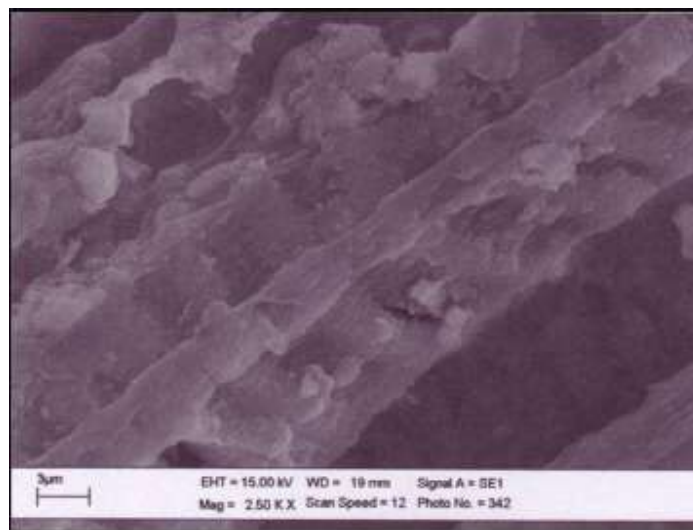
Fuente: (Kim & Netravali, 2010)

Figura 25. SEM Fibra de yute



Fuente: (Singh et al., 2018)

Figura 26. SEM Fibra de coco



Fuente: (Asasutjarit et al., 2009)

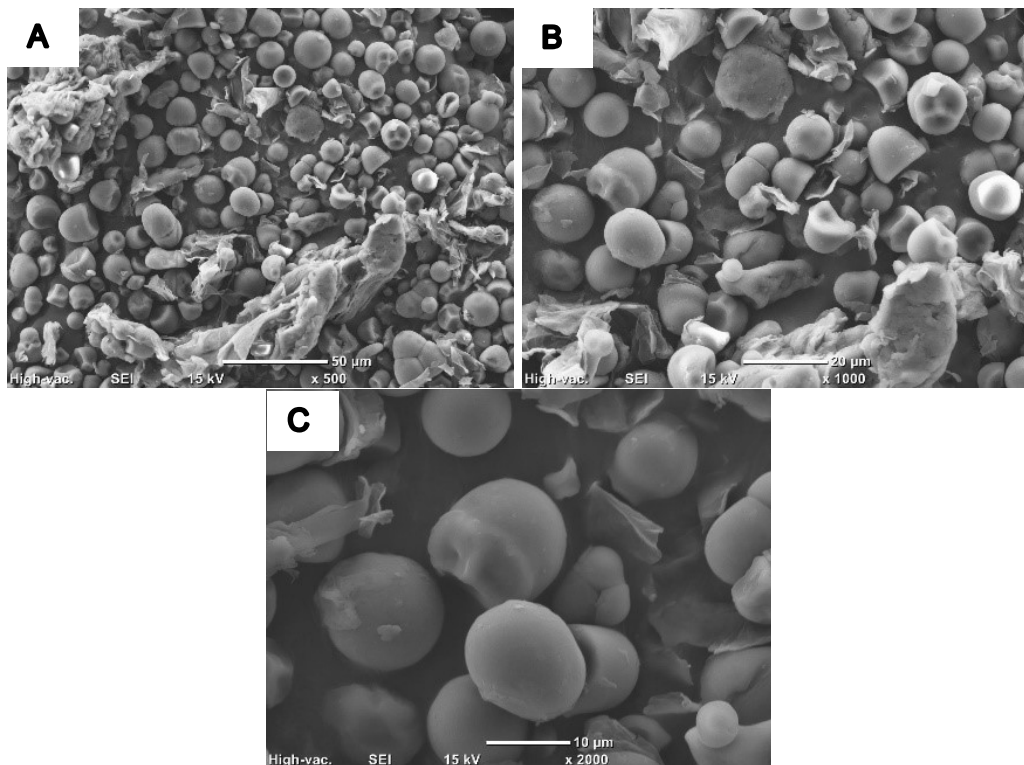
El afrecho de yuca contiene aproximadamente 17,5% de fibra y 82,5 % en peso de almidón (Pasquini et al., 2010).

La micrografía SEM de afrecho de yuca (Figura 27) indica la presencia de gránulos de almidón en una gran cantidad y estos se encuentran rodeados por partículas fibrosas de esta materia prima. Estos gránulos son inicialmente globulares, pero se aprecia que solo una cantidad reducida se encuentra intacta, ya que, debido al

proceso de extracción del almidón, muchos de estos gránulos se rompieron parcialmente (Pasquini et al., 2010).

Este resultado coincidió con investigaciones previas realizadas por Leonel & Cereda, 2000 y Pasquini et al., 2010, quienes investigaron los residuos generados del proceso de extracción de almidón de yuca.

Figura 27. Micrografías SEM de Afrecho de yuca



A: Afrecho de yuca 500x (50µm) B: Afrecho de yuca 1000x (20µm) C: Afrecho de yuca 2000x (10µm)

Si se compara una micrografía de almidón de yuca con una de afrecho de yuca es posible observar diferencias notables, inicialmente el tamaño de los gránulos de almidón en el afrecho es menor que en el almidón extraído. Por otro lado, hay un cambio en su estructura superficial, en el afrecho los gránulos presentan formas irregulares y asimétricas mientras que en almidón extraído existe una homogeneidad en los gránulos siendo estos más redondo y con una superficie lisa (Mina, 2012).

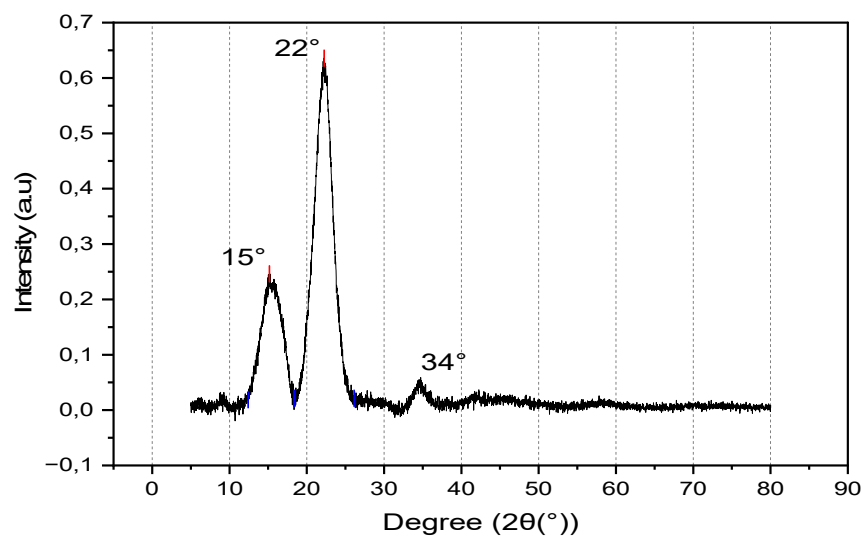
3.1.8 Análisis de cristalinidad relativa

Las fibras de fique al estar compuestas por fibrillas que poseen una estructura de tipo vascular compuesta por hemicelulosa y lignina que unen las fibrillas compuestas por celulosa, tienen la capacidad de brindar soporte y ayuda en el transporte de nutrientes/agua; esta característica permite tener una estructura organizada que proporciona rigidez y soporte en las hojas de la planta de fique, así que el análisis del grado de cristalinidad en estas fibras permite identificar propiedades físicas, químicas y mecánicas de las fibras, dependiendo del grado de organización de sus estructuras internas (Ovalle Serrano et al., 2017).

El gráfico de difracción en fibra de fique (Figura 28) presenta picos de intensidad en $2\theta=15.7^\circ$, 22.3° y 34.7° ; que corresponden a las zonas cristalinas correspondientes a la celulosa tipo I. En el ángulo de difracción de aproximadamente 15° indica el plano cristalino 100 y a 22° se indica la presencia del plano cristalino 010, que son los planos característicos de la celulosa en la fibra de fique. En cuanto al área amorfa presente en el espectro representa la lignina (Ovalle Serrano et al., 2017).

En este caso, un porcentaje de cristalinidad del 63% indica que aproximadamente dos tercios de las fibras de fique presentan una estructura altamente ordenada y cristalina, lo que confiere a esta fibra una mayor resistencia y rigidez. Esta cristalinidad se debe a la organización de las cadenas de celulosa en la fibra, que se disponen en una disposición regular y uniforme. Además, la presencia de compuestos como la lignina y la hemicelulosa pueden afectar la cristalinidad al actuar como "pegamento" entre las fibras y modificar su estructura. El alto porcentaje de cristalinidad en la fibra de fique la convierte en un material de gran interés para la fabricación de productos de alta resistencia y durabilidad.

Figura 28. Espectro DRX para la fibra de fique



En términos de porcentaje de cristalinidad, la fibra de fique con un 63% tiene un porcentaje más alto en comparación con la fibra de jute, sisal y coco (Tabla 8). Esta diferencia en la cristalinidad puede afectar las propiedades mecánicas y físicas de las fibras.

La alta cristalinidad de la fibra de fique puede resultar en una mayor rigidez y resistencia a la tracción en comparación con las otras fibras naturales. Esto hace que la fibra de fique sea una opción ideal para aplicaciones que requieren una alta resistencia, como la fabricación de materiales biocompuestos. Por otro lado, las fibras de jute, sisal y coco, con una cristalinidad más baja, pueden ser más adecuadas para aplicaciones en las que se requiere flexibilidad y elasticidad (Faruk et al., 2012).

En términos de su uso en materiales compuestos como macetas biodegradables, la cristalinidad de las fibras puede tener un impacto significativo en las propiedades mecánicas y físicas del material compuesto. En general, los materiales compuestos que utilizan fibras con mayor cristalinidad pueden tener una mayor rigidez y resistencia, lo que los hace adecuados para aplicaciones que requieren una mayor durabilidad y resistencia mecánica (Reichert et al., 2020).

Tabla 8. Porcentajes de cristalinidad en otras fibras naturales.

Fibra	Cristalinidad (%)	Referencia
Jute	55,31	(Barreto et al., 2010)
Sisal	57	(Guerra et al., 2021)
Coco	57	(Tomczak et al., 2007)

El afrecho de yuca al estar compuesto tanto de almidón como de fibra presenta patrones en su difractograma (Figura 29) correspondientes a sus dos componentes. El almidón de yuca que puede ser del tipo A ($2\theta=18,1$ y $23,1$), del tipo B ($2\theta=15,1$ y $17,4$) o del tipo C el cual es una mezcla de los dos tipos anteriores, y la fibra que posee sus picos representativos en 15° y 22° que corresponden a la celulosa que la compone (Teixeira et al., 2012).

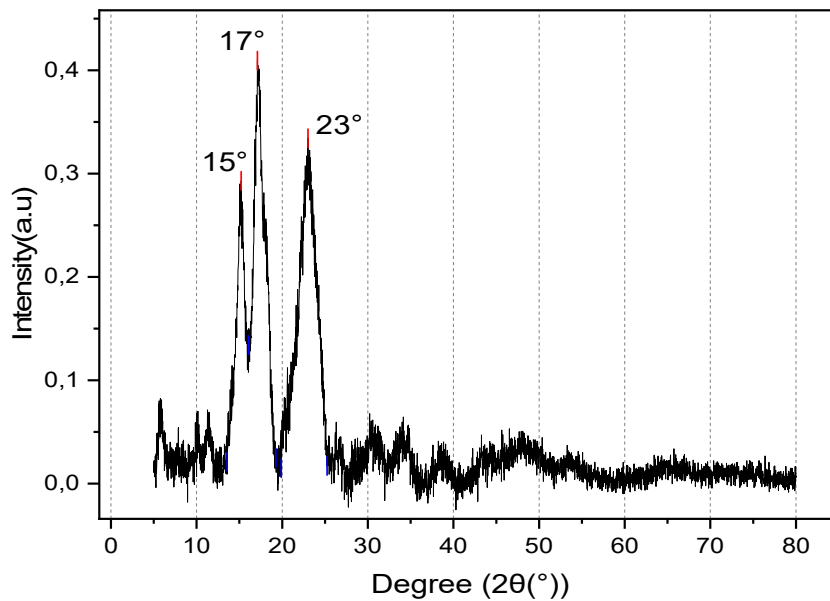
Los picos obtenidos se ubican en $2\theta=15.2^\circ$, 17.1° , y 23° , así que representa un almidón de tipo C dentro de la estructura, ya que este tipo intermedio de almidón presenta los patrones característicos de los almidones de los cereales (tipo A) y los almidones de frutas y tubérculos (tipo B), este representa un almidón nativo (Aristizábal et al., 2007).

Por otro lado, la cristalinidad en el almidón de yuca puede variar dependiendo de factores como el grado de purificación del almidón y el procesamiento al que ha sido sometido. Los métodos de extracción y purificación pueden influir en la cantidad y

organización de la amilosa y la amilopectina presentes, lo que a su vez afecta la cristalinidad. Además, el tratamiento térmico y las condiciones de almacenamiento también pueden influir en la cristalinidad del almidón de yuca (Teixeira et al., 2012).

Se obtuvo un porcentaje de cristalinidad del 45,3% y en investigaciones previas se encontró un valor del 43,7% de cristalinidad (Pasquini et al., 2010)

Figura 29. Espectro DRX para el Afrecho de yuca



3.2 ANÁLISIS DE MEZCLAS Y SUS PROPIEDADES MECÁNICAS

3.2.1 Modelo de evaluación de datos

El análisis estadístico de los datos obtenidos (Tabla 9) se inició con una prueba de normalidad de Shapiro Wilk, encontrándose que los datos flexión y absorción de agua siguieron una distribución normal. En seguida con base en el valor p , el coeficiente de determinación R^2 (ajustado) y el valor de falta de ajuste, se procedió a seleccionar el modelo más adecuado, el cual describiese con mayor precisión el comportamiento de las variables estudiadas.

Se evaluaron los datos utilizando un modelo inverso, el cual asume una relación inversa entre los niveles de los componentes de la mezcla y la respuesta. En este caso particular, esta suposición resulta útil debido a la presencia de una matriz de acoplamiento y una fibra de refuerzo en la mezcla. A medida que se aumenta o disminuye la cantidad de estos componentes, se esperan cambios en las propiedades mecánicas del material biocompuesto resultante y en la homogeneidad de la mezcla (Suárez Castañeda et al., 2017).

Inicialmente, se evaluaron los datos utilizando un modelo cuadrático, el cual presentó valores de R cuadrado (R^2) entre el 50% y 80% (Tabla 11). Sin embargo, se decidió explorar un modelo inverso, ya que un valor de R^2 más cercano al 100% indica que el modelo puede explicar una mayor parte de la variabilidad en la respuesta (Gutiérrez P & De la Vara S, 2012).

Al evaluar los datos con el modelo inverso, se obtuvieron valores de R^2 entre el 85% y 95% (Tabla 10). Estos resultados refuerzan la importancia y la confianza en el modelo inverso, ya que es capaz de explicar una mayor proporción de la variabilidad de la respuesta en comparación con el modelo cuadrático (Gutiérrez P & De la Vara S, 2012).

Al considerar la naturaleza de los componentes y sus efectos en las propiedades mecánicas y la homogeneidad de la mezcla, se optó por utilizar un modelo inverso, el cual mostró un mejor ajuste a los datos con valores de R^2 más altos (Gutiérrez P & De la Vara S, 2012).

El análisis de varianza identificó diferencias significativas en los tratamientos evaluados, se obtuvieron valores p para todas las variables menores a 0,05 lo cual indica la presencia de diferencias entre las mezclas que se valoraron (Anexo B). Este contraste puede deberse principalmente a la calidad de la mezcla que se logró obtener ya que, al ir aumentando la cantidad de fibra en la matriz, la capacidad de acoplamiento de los dos componentes se ve disminuida.

Tabla 9. Análisis de varianza en las propiedades mecánicas y absorción de agua

Esfuerzo de flexión			
Modelo	Valor p	R^2	R^2 (Ajustado)
Cuadrático	0,02	78,28%	74,66%
Inverso	0,04	92,79%	89,90%
Porcentaje de deformación			
Modelo	Valor p	R^2	R^2 (Ajustado)
Cuadrático	0,006	62,38%	56,11%
Inverso	0,000	94,00%	91,60%
Modulo elástico			
Modelo	Valor p	R^2	R^2 (Ajustado)
Cuadrático	0,000	65,26%	59,47%
Inverso	0,006	90,14%	86,19%
Absorción de agua			
Modelo	Valor p	R^2	R^2 (Ajustado)
Cuadrático	0,004	75,82%	69,89%
Inverso	0,000	89,93%	87,95%

3.2.2 Propiedades mecánicas de flexión en el material biocompuesto

Se realizó el procedimiento descrito en la metodología para obtener el material compuesto y las probetas a las cuales se les aplicó las pruebas de flexión y absorción de agua. El acoplamiento de los dos componentes fue minucioso hasta obtener una masa homogénea donde se observó un buen proceso de mezclado y del mismo modo en el moldeo de las probetas se obtuvo muestras uniformes (Cajiao et al., 2016; Navia P. et al., 2013).

Las diferentes mezclas fueron evaluadas a través de las pruebas de flexión y absorción de agua, con el fin de determinar las propiedades mecánicas y la resistencia a la humedad. Estas pruebas ayudan a identificar la mejor proporción de cada componente para producir un material compuesto con las características de resistencia deseadas, en las tablas 9 y 10 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en la prueba de flexión del material.

La mezcla T4G65F35 fue la que obtuvo la mayor resistencia en la prueba de flexión, presenta en sus componentes un 65% en gel de afrecho de yuca y un 35% en fibra de fique molida. El esfuerzo, el porcentaje de deformación y el Módulo elástico arrojaron los valores máximos en esta mezcla con $20,81 \pm 0,89$ MPa, $2,32\% \pm 0,11$ y $1504,72 \pm 89,51$ GPa respectivamente, asignando las características más sobresalientes. Este resultado puede ser explicado por la capacidad de acoplamiento que se genera entre los dos componentes.

En cuanto a la mezcla con la mayor inclusión de fibra (T1G60F40) con un 60% en gel de afrecho de yuca y un 40% en fibra de fique molida, se obtuvieron los valores de sus propiedades mecánicas más bajos entre las mezclas. El esfuerzo, porcentaje de deformación y el módulo elástico fueron de 10.18 ± 0.41 MPa, $1.59\% \pm 0,04$ y 968.66 ± 69.24 GPa respectivamente. Este comportamiento se puede explicar a través de la capacidad de acoplamiento entre la matriz y la fibra ya que al disminuir la cantidad de matriz y aumentar la proporción de fibra, fue más complicado generar una mezcla uniforme del material compuesto, por ende, se formaron zonas ricas en fibras y pobres en gel, lo cual debilitó la estructura interna del material compuesto.

Por otro lado, la mezcla que tenía la mayor cantidad en gel de afrecho de yuca (T2G80F20) con un 80% y el valor mínimo de fibra de fique molida con un 20%, no obtuvo los valores más altos ni tampoco los más bajos en cuanto a las propiedades mecánicas. En esta mezcla se generó un acoplamiento de forma más eficiente, permitiendo obtener un material muy homogéneo pero debido a que la cantidad de fibra de fique era baja, no se logró obtener valores de resistencia altos como en otras mezclas con mayor cantidad de fibra.

Tabla 10. Propiedades mecánicas de las mezclas.

Tratamiento	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)	M. elástico (GPa)
T1G60F40	11,06 ± 0,49	1,64 ± 0,06	1027,55 ± 49,59
T2G80F20	12,69 ± 0,63	2,18 ± 0,11	1093,39 ± 63,21
T3G70F30	18,48 ± 0,48	2,17 ± 0,12	1326,17 ± 45,44
T4G65F35	20,81 ± 0,89	2,32 ± 0,11	1504,72 ± 89,51
T5G75F25	19,12 ± 0,75	2,15 ± 0,12	1306,70 ± 76,47
MIN	11,06 ± 0,49	1,64 ± 0,06	1027,55 ± 49,59
MAX	20,81 ± 0,89	2,32 ± 0,11	1504,72 ± 89,51

Un estudio previo evaluó las propiedades mecánicas de un material compuesto por polietileno aluminio reforzado con agro fibras continuas de fique (Hidalgo; et al., 2011), se estudió cantidades de inclusión diferentes en las mezclas y concluyeron que las propiedades mecánicas del material compuesto son más altas a medida que se aumenta la cantidad de fibra de fique en el material y obtuvieron las mejores propiedades en un material compuesto por 50% de matriz y 50% de fibras de fique (Hidalgo; et al., 2011). Este resultado concuerda con los resultados obtenidos en esta investigación, ya que las propiedades mecánicas del material compuesto mejoraron con el aumento de la cantidad de fibra.

Además, se han estudiado materiales compuestos por fibras de fique y matriz de poliestireno, la cual obtuvo valores de resistencia a la flexión de 47,07 MPa y un módulo elástico de 1480,25 MPa (Pérez G; 2014) y también materiales compuestos por fibra de vidrio y poliéster, estos presentaron propiedades mecánicas a través de la prueba de flexión por un valor de 278,4 MPa en resistencia y de 11350 MPa en su módulo elástico (Rodríguez & Vázquez; 2003). Estos valores muestran una mayor resistencia comparado con el material estudiado en esta investigación.

3.2.3 Absorción de agua en material compuesto

Evaluar la capacidad de absorción de agua de un material compuesto es de suma importancia porque esta propiedad puede afectar significativamente su rendimiento y durabilidad. La absorción de agua en los productos de este tipo depende de diversos factores, incluyendo el contenido de fibra, la temperatura, la orientación y el tipo de fibras, así como la permeabilidad, el área expuesta de la superficie, la porosidad y la hidrofobicidad de los componentes. Estos aspectos influyen en el comportamiento higroscópico del material, afectando sus propiedades y rendimiento bajo diversas condiciones ambientales (Sreekumar et al., 2008).

Un enfoque clave para mejorar la aplicación de materiales compuestos es el estudio detallado de aquellos basados en fibra de fique y afrecho de yuca gelatinizado, los cuales se destacan por su sostenibilidad y características únicas (Rodríguez et al., 2014).

Los resultados obtenidos en la prueba de absorción de agua (Tabla 10) muestran el porcentaje promedio de absorción para cada una de las mezclas evaluadas, junto con los valores mínimos y máximos. Dado que ambos componentes del material son hidrofílicos, con la capacidad de absorber grandes cantidades de agua, se esperaba una alta absorción, como se evidencia en los datos obtenidos.

El afrecho de yuca, uno de los componentes del material, presenta la mayor capacidad de absorción. Por lo tanto, la mezcla con mayor cantidad de gel de afrecho de yuca y menor cantidad de fibra de fique (T2G80F20) muestra el valor más alto con un $330,98\% \pm 0,18$. Por otro lado, las probetas de material compuesto con menor cantidad de gel de afrecho de yuca y mayor cantidad de fibra de fique (T1G60F40) obtuvieron el porcentaje promedio de absorción más bajo de todas las mezclas, con un $220,11\% \pm 0,11$. Esto se debe a que la fibra de fique tiene una menor capacidad de absorción de agua en relación con el afrecho (Martínez et al., 2018).

Se observa una tendencia clara, los porcentajes promedio de absorción de agua disminuyen a medida que se reduce la cantidad de gel de afrecho de yuca en las probetas de material compuesto. Por lo tanto, se concluye que, el gel de afrecho de yuca es el componente determinante que tiene una mayor influencia en la capacidad de absorción de agua en comparación a la fibra de fique.

Tabla 11. Absorción de agua en material compuesto

Mezcla	Promedio de absorción (%)
T1G60F40	$220,11 \pm 0,11$
T2G80F20	$330,98 \pm 0,18$
T3G70F30	$261,22 \pm 0,15$
T4G65F35	$266,60 \pm 0,08$
T5G75F25	$287,19 \pm 0,12$
MIN	$220,11 \pm 0,11$
MAX	$330,98 \pm 0,18$

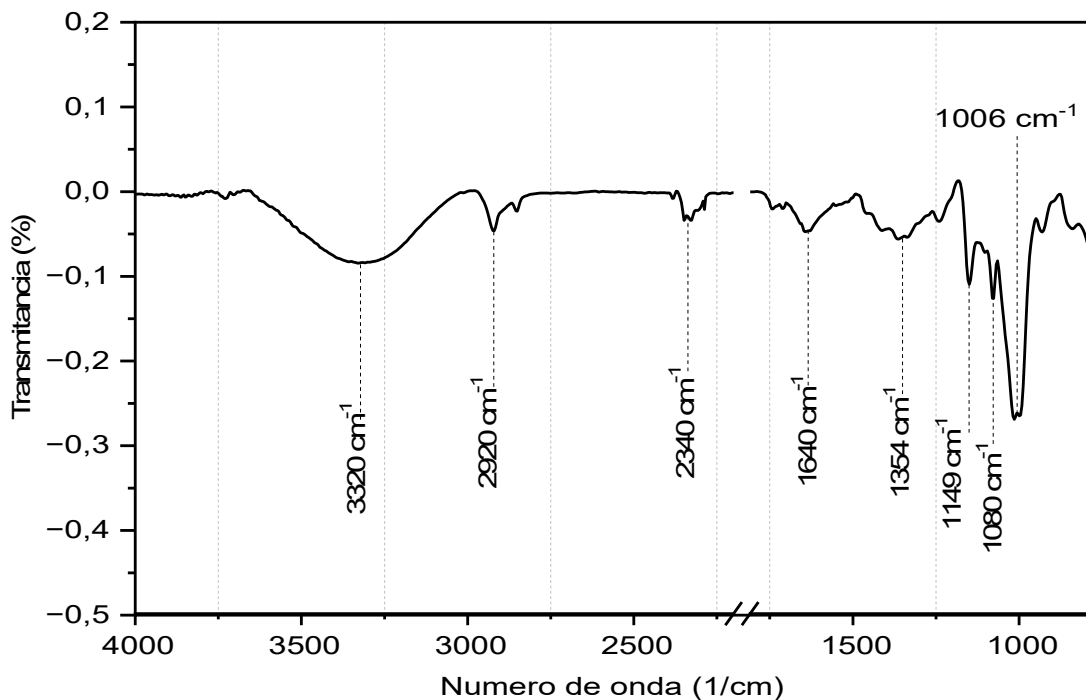
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

3.3.1 Análisis por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

El análisis del espectro FTIR del material compuesto obtenido a partir de la combinación de fibra natural de fique y afrecho de yuca muestra la presencia de los grupos funcionales característicos de ambos componentes. La combinación de ambas materias primas en el material compuesto muestra la presencia de los grupos hidroxilo (-OH), de los enlaces de hidrógeno entre las fibras de fique y el afrecho de yuca, lo que contribuye a la resistencia mecánica del material compuesto. La presencia de los grupos carbonilo (-C=O) y éster (-C-O-C-) indica la presencia de enlaces covalentes entre las fibras de fique y el afrecho de yuca, esto también contribuye a la resistencia mecánica del material compuesto (Mina, 2012).

En general, la similitud en los espectros FTIR de las materias primas y del material compuesto (Figura 30) indica que el procesamiento físico utilizado para la fabricación del material compuesto no afectó significativamente su estructura química. Esto es una ventaja en términos de sostenibilidad, ya que se pueden utilizar estos materiales renovables sin necesidad de modificar su estructura química para obtener productos con buenas propiedades mecánicas.

Figura 30. Espectro FTIR del material compuesto

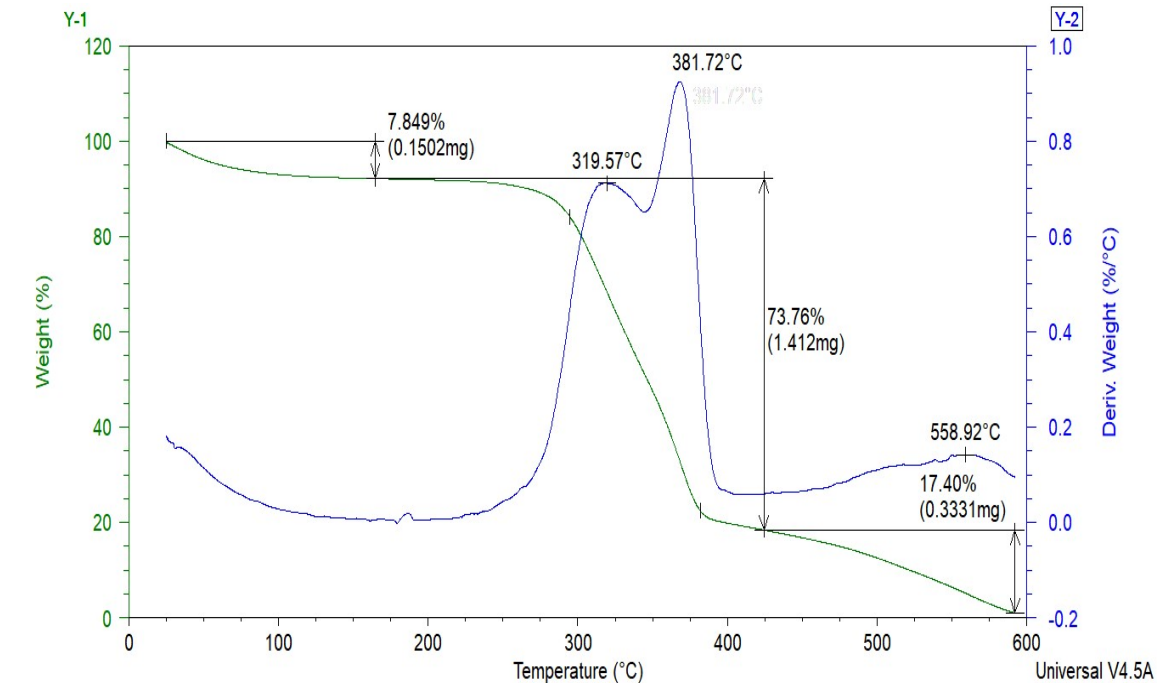


3.3.2 Análisis de las propiedades térmicas a través de TGA

TGA es una de las pruebas más populares tanto en la industria manufacturera como de materiales, este análisis permite probar muchos materiales diferentes, como metales, polímeros, cerámica y vidrio. El análisis TGA es esencial para comprender las propiedades térmicas y el comportamiento del material compuesto de fibra de fique y afrecho de yuca gelatinizado (Prime et al., 2009).

En el análisis TGA realizado en el material compuesto de fibra de fique y afrecho de yuca gelatinizado (Figura 31), se puede observar una reducción en el peso alrededor de los 100 °C, lo que corresponde a la evaporación del agua presente en el material. Su deterioro inicia alrededor de los 225 °C eliminando primero la porción de hemicelulosa, luego alrededor de los 381 °C se reduce la porción de celulosa y finalmente la lignina que es el componente más difícil de degradar se inicia su proceso de degradación alrededor de los 558 °C; estas reducciones están más relacionadas a los componentes de la fibra de fique debido a que se encuentra en gran cantidad en el material compuesto. En cuanto a la reducción del peso, en primer lugar, se evidencia una reducción correspondiente al agua evaporada, luego una reducción que corresponde a celulosa y hemicelulosa y finalmente una reducción expuesta a la lignina (Gómez Hoyos et al., 2012).

Figura 31. TGA Material compuesto



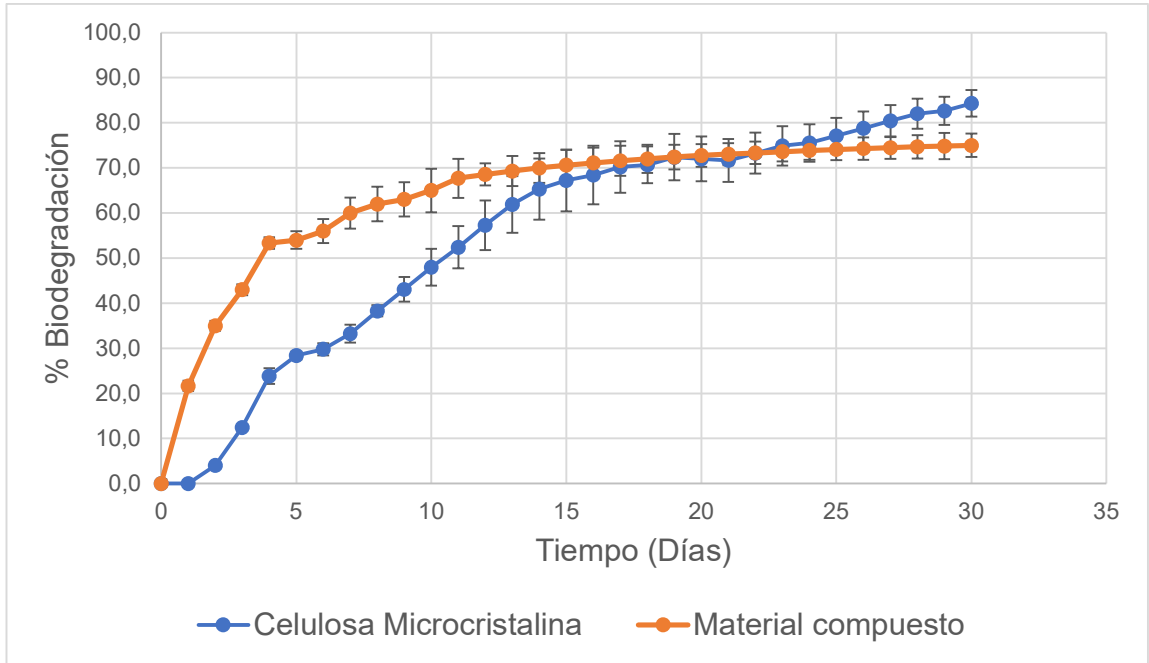
3.3.3 Biodegradación del material compuesto

El resultado de esta prueba arrojó un gráfico que relaciona el porcentaje de biodegradación y el tiempo en el que se generaron cambios en el material estudiado, evidenciando el proceso que ocurrió en el material compuesto por afrecho de yuca y fibra de fique. Además, se realizó esta prueba en celulosa microcristalina, así como lo indica la norma ISO 14855-1, lo cual permitió tener un indicador de referencia que genere una mayor confiabilidad de la prueba, ya que según la norma se establece un límite mínimo con el cual se verifica la veracidad del proceso realizado, por lo cual, la celulosa debió alcanzar mínimo un 70% de biodegradación en 30 días de prueba (Figura 32).

Inicialmente se observó un crecimiento acelerado del porcentaje de biodegradación, las dos primeras semanas el material compuesto logro llegar hasta un 70,6%; su descomposición es muy rápida, en el primer día se había biodegradado el 21,7% y en el quinto día ya había alcanzado un 54%; esta fase inicial de biodegradación se le puede atribuir a la descomposición de la matriz de afrecho de yuca que compone al material, ya que sus estructuras tienden a descomponerse muy rápidamente. Las dos primeras semanas se generó la descomposición más alta y luego fue aumentando poco a poco hasta llegar a un 75% en 30 días, la fase de biodegradación lenta a partir de la segunda semana se le asigna a la fibra de fique que compone el material, ya que es más difícil de descomponer y necesita un mayor tiempo para biodegradarse completamente, debido a las estructuras que posee principalmente a la celulosa.

Otro estudio en el que se evaluó el comportamiento frente a la biodegradación de material compuesto por materias primas de origen orgánico presento resultados similares, indicando inicialmente una fase de biodegradación rápida correspondiente a la matriz del compuesto y posterior una fase de biodegradación lenta asignada a la fibra que compone el material, logrando alcanzar un porcentaje de biodegradación mayor al 80% en 30 días (Palechor Trochez, 2017).

Figura 32. Biodegradación de material compuesto (Afrecho de yuca- Fibra de fique) y celulosa microcristalina.



4. CONCLUSIONES

La caracterización físico-mecánica y morfológica de la fibra de fique y el afrecho de yuca, permite concluir que estas materias primas tienen propiedades únicas y valiosas para su uso en diferentes aplicaciones. La fibra de fique, por ejemplo, tiene una alta resistencia mecánica y una capacidad de absorción de agua baja comparada con otras fibras naturales; mientras que el afrecho de yuca proporciona las características del almidón y su potencial uso podría evitar la contaminación de suelos o fuentes hídricas.

La fase inicial de adecuación de materias primas permitió obtener materiales con una mayor eficiencia de trabajo y una mezcla de componentes efectiva.

En la segunda fase fue importante el uso de un diseño de mezclas, el cual permitió variaciones en el porcentaje de los componentes del material compuesto y así se logró verificar cuales son las mejores proporciones que permitieron establecer a una de las mezclas como la mejor, evaluando sus propiedades mecánicas. Es necesario resaltar que el resultado se inclinó a las mezclas con mayor inclusión de fibra de fique como las que presentaron mayor resistencia mecánica.

En la fase final se logró obtener las macetas moldeadas de forma manual, las cuales pueden ser usadas en el cultivo de pimientos que se planteó en este estudio.

Se obtuvo un material totalmente biodegradable ya que sus dos componentes son de carácter orgánico.

5. RECOMENDACIONES

Se haría necesario conocer la cantidad de almidón mínima con la que se puede lograr gelatinizar el afrecho de yuca y así realizar la evaluación del material compuesto generado con tal cantidad de almidón dentro del afrecho de yuca.

Se recomienda el uso de un molino específico para fibras que evite las fugas de material y realice un proceso de molienda más rápido.

Se sugiere el uso de fibras largas en la fabricación del material y así lograr establecer una comparación de las propiedades mecánicas generadas por estas y las propiedades que se obtuvieron en este estudio.

Se recomienda realizar el diseño de un molde que se acople a la máquina de moldeo por compresión y así lograr obtener macetas con las medidas que se deseen, además, esto permitiría establecer un espesor, con el cual, evaluar su comportamiento mecánico.

Se propone realizar una prueba en campo de germinación en las macetas, que permita evaluar su resistencia y funcionamiento en condiciones ambientales. Además, establecer condiciones que permitan obtener un análisis del comportamiento de las macetas, como por ejemplo la variación de la humedad o la cantidad de agua que se les suministre.

BIBLIOGRAFÍA

AHMED, S. (2017). Mechanical and surface properties of technical and single flax fiber in micro and nano scale. University of Agriculture and Applied Science.

ARISTIZÁBAL, J., SÁNCHEZ AUTORAS, T., & LORÍO, D. M. (2007). Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación Roma, 2007 Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca boletín de servicios agrícolas de la fao 163.

ARPITHA, G. R., & YOGESHA, B. (2017). An Overview on Mechanical Property Evaluation of Natural Fiber Reinforced Polymers. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2755–2760. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.02.153>

ASASUTJARIT, C., CHAROENVAI, S., HIRUNLABH, J., & KHEDARI, J. (2009). Materials and mechanical properties of pretreated coir-based green composites. *Composites Part B: Engineering*, 40(7), 633–637. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.009>

BARRETO, A. C. H., ESMERALDO, M. A., ROSA, D. S., FECHINE, P. B. A., & MAZZETTO, S. E. (2010). Cardanol biocomposites reinforced with jute fiber: Microstructure, biodegradability, and mechanical properties. *Polymer Composites*, 31(11), 1928–1937. <https://doi.org/10.1002/pc.20990>

BEHERA, A. K., AVANCHA, S., DAS, N., & ADHIKARI, B. (2021). Mechanical and biodegradation analysis of fully biodegradable eco-friendly natural fiber reinforced sapling pot. *Polymer Composites*, 42(6), 1–10. <https://doi.org/10.1002/pc.26024>

CAJIAO, E. S., BUSTAMANTE, L. E., CERÓN, A. R., & VILLADA, H. S. (2016). Efecto de la Gelatinización de Harina de Yuca sobre las Propiedades Mecánicas, Térmicas y Microestructurales de una Matriz Moldeada por Compresión. *Información Tecnológica*, 27(4), 53–62. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000400006>

CECILIA, J. A., GARCÍA SANCHO, C., MAIRELES TORRES, P. J., & LUQUE, R. (2019). Industrial Food Waste Valorization: A General Overview. *Biorefinery: Integrated Sustainable Processes for Biomass Conversion to Biomaterials, Biofuels, and Fertilizers*, 253–277. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-10961-5-11>

Colombia Productiva. (2015). Guía empresarial. In *Guía empresarial Economía Circular* (pp. 2–25).

DAZA ORSINI, S. M., & PARRA APARICIO, G. P. (2021). Espectroscopia de infrarrojo con transformada de fourier (ft-ir) para análisis de muestras de harina de trigo, fécula de maíz y almidón de yuca. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 19(1), 5–

16.

DELVASTO, S., TORO, E. F., PERDOMO, F., & DE GUTIÉRREZ, R. M. (2010). An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. *Construction and Building Materials*, 24(2), 187–192. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.01.010>

DINORA VERA-ACEVEDO, L.; RAUFLLET, E. Análisis de la Estrategia Nacional de Economía Circular de Colombia a partir de dos modelos. *Estudios Políticos* (01215167), [s. l.], n. 64, p. 26–52, 2022.

EK, P., & GANJYAL, G. M. (2020). Basics of extrusion processing. In *Extrusion Cooking*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815360-4.00001-8>

ESPINO PENILLA, M., & KOOT, Y. (2020). Nuestro mundo cubierto de plástico: de la movilidad global del plástico a las consecuencias y respuestas locales. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 12(4), 146–160. <https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v12.n4.759>

FARUK, O., BLEDZKI, A. K., FINK, H. P., & SAIN, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>

FERNANDES DE ALMEIDA, P., S LANNES, S. C., ARAUJO CALARGE, F., CURVELO SANTANA, J. C., & MICHEL DE BRITO FARIAS, T. (2012). FTIR characterization of gelatin from chicken feet. In *J. Chem. Chem. Eng* (Vol. 6). <https://www.researchgate.net/publication/284677461>

FUENTES, R. A., BERTHE, J. A., BARBOSA, S. E., & CASTILLO, L. A. (2021). Development of biodegradable pots from different agroindustrial wastes and byproducts. *Sustainable Materials and Technologies*, 30, e00338. <https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2021.E00338>

GARCÍA PATERNINA, M., CARDONA ARBELÁEZ, A. A., & GARCÍA MOGOLLÓN, C. A. (2020). Diagnóstico del manejo del afrecho de yuca en el departamento de Sucre. *Innovación En La Región Caribe de Colombia: Aportes Teóricos y Buenas Prácticas*, 188–201. <https://doi.org/10.21892/9789585547858.9>

GAZGA, C., & SALAZAR, A. L. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales 7a edición* Related papers Sext a edición *Ciencia e ingeniería de mat eriales Mauro Maroa* Fundament os de la ciencia e ingeniería de mat eriales, 4t h Edit ion Fundament os de la ciencia e ingenie... María Alejandra Bet anc.

GÓMEZ HOYOS, C., ALVAREZ, V. A., ROJO, P. G., & VÁZQUEZ, A. (2012). Fique fibers: Enhancement of the tensile strength of alkali treated fibers during tensile load application. *Fibers and Polymers*, 13(5), 632–640. <https://doi.org/10.1007/s12221->

[012-0632-8](#)

GOMEZ ORDOÑEZ, D. J. (2020). Diagnostico ambiental y formulacion de alternativas de produccion mas limpia (pml) para las fincas productoras de fique en el municipio de caldono departamento del cauca. Corporacion Universitaria Autonoma Del Cauca, 1–87.

GUERRA, G. N., CABRAL ALBUQUERQUE, E. C. D. M., CAMPOS, L. M. A., & PONTES, L. A. M. (2021). Chemical and Physicochemical Characterization of Alkali Pretreated and in Natura Sisal Solid Waste. *Journal of Natural Fibers*, 18(2), 203–212. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1612815>

GUTIÉRREZ P, H., & DE LA VARA S, R. (2012). Análisis y diseño de experimentos (Vol. 3). <https://www.facebook.com/pages/Interfase->

HERNÁNDEZ VIDAL, N. E., LÓPEZ BAUTISTA, V., MORALES MORALES, V., MÉNDEZ ORDÓÑEZ, W., & CALDERÓN OSORIO, E. S. (2018). Caracterización química de la Fibra de Coco (*Cocus nucifera* L.) de México utilizando Espectroscopía de Infrarrojo (FTIR). *Ingeniería y Región*, 20, 67–71. <https://doi.org/10.25054/22161325.1914>

HIDALGO, Miguel A, MUÑOZ, Mario F, & QUINTANA, Karen J. (2011). Desempeño mecánico del compuesto polietileno aluminio reforzado con agro fibras continuas de fique. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 31(2), 187-194.

HUSZKA, G., & GIJS, M. A. M. (2019). Super-resolution optical imaging: A comparison. *Micro and Nano Engineering*, 2, 7–28. <https://doi.org/10.1016/J.MNE.2018.11.005>

ITA-NAGY, D., VÁZQUEZ-ROWE, I., KAHHAT, R., QUISPE, I., CHINGA-CARRASCO, G., CLAUSER, N. M., & AREA, M. C. (2020). Life cycle assessment of bagasse fiber reinforced biocomposites. *Science of the Total Environment*, 720, 137586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137586>

KALIA, S., DUFRESNE, A., CHERIAN, B. M., KAITH, B. S., AVÉROUS, L., NJUGUNA, J., & NASSIOPOULOS, E. (2011). Cellulose-based bio- and nanocomposites: A review. *International Journal of Polymer Science*, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/837875>

KARIMAH, A., RIDHO, M. R., MUNAWAR, S. S., ADI, D. S., ISMADI, DAMAYANTI, R., SUBIYANTO, B., FATRIASARI, W., & FUDHOLI, A. (2021). A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 2442–2458. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.06.014>

KHANLOU, H. M., WOODFIELD, P., SUMMERSCALES, J., & HALL, W. (2017).

Consolidation process boundaries of the degradation of mechanical properties in compression moulding of natural-fibre bio-polymer composites. *Polymer Degradation and Stability*, 138, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.004>

KIM, J. T., & NETRAVALI, A. N. (2010a). Mercerization of sisal fibers: Effect of tension on mechanical properties of sisal fiber and fiber-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(9), 1245–1252. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.05.007>

KIM, J. T., & NETRAVALI, A. N. (2010b). Mercerization of sisal fibers: Effect of tension on mechanical properties of sisal fiber and fiber-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(9), 1245–1252. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.05.007>

KUMAR, S., SHAMPRASAD, M. S., VARADARAJAN, Y. S., & SANGAMESHA, M. A. (2021). Coconut coir fiber reinforced polypropylene composites: Investigation on fracture toughness and mechanical properties. *Materials Today: Proceedings*, 46, 2471–2476. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.01.402>

LEONEL, M., & CEREDA, M. P. (2000). Extração da fécula retida no resíduo fibroso do processo de produção de fécula de mandioca. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 20(1), 122–127. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612000000100023>

LOPES, F. F. M., ARAÚJO, G. T. DE, NASCIMENTO, J. W. B. DO, GADELHA, T. S., & SILVA, V. R. da. (2010). Estudo dos efeitos da acetilação em fibras de sisal. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(7), 783–788. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000700015>

MARTINEZ, D. G., FEIDEN, A., BARICCATTI, R., & ZARA, K. R. de F. (2018). Ethanol production from waste of cassava processing. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(11), 1–8. <https://doi.org/10.3390/app8112158>

MAZÓN ORTIZ, G. E. (2017). Caracterización mecánica del material compuesto de matriz poliéster con fibra de coco para la determinación de propiedades mecánicas en aplicaciones industriales.

MINA, J. H. (2012). Caracterización Físico-Mecánica De Un Almidón Termoplástico (Tps) De Yuca Y Análisis Interfacial Con Fibras De Fique Physico-Mechanical Characterization of Thermoplastic Cassava Starch (Tps) and Interfacial Analysis With Fique Fibers Caracterização Físico. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(2), 99–109.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, M. (2019). Plan Nacional Para La Gestión Sostenible De Los Plásticos De Un Solo Uso. In Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (p. 30).

Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). Estrategia Nacional de Economía Circular. In Gobierno de Colombia.

MONTUFAR M, A., & REMACHE C, A. (2021). Materiales compuestos de polímero reforzado con fibra de cabuya y coco aplicado al sector automotriz. Revista Científica Dominio de Las Ciencias, 7, 436–465.

MORA ESPINOSA, W. J., RAMÓN VALENCIA, B. A., & RAMÓN VALENCIA, F. (2014). Desarrollo De Materiales Biocompuestos Reforzados Con Fibras Naturales Colombias. Revista Ambiental Agua, Aire Y Suelo, 4(2), 1–7. http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RA/article/view/507

MORA-ESPINOSA, W. J., & RAMÓN-VALENCIA, B. A. (2017). Thermal, mechanical, and morphological characterization of Colombian natural fibers as potential reinforcement for biocomposites. Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 41(161), 479–489. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.525>

MORENO MONTOYA, L. E., OSORIO SERNA, L. R., & TRUJILLO DE LOS RÍOS, E. E. (2011). Estudio de las características físicas de haces de fibra de Guadua angustifolia. Revista Científica Ingeniería y Desarrollo - Universidad Tecnológica de Pereira, 20(20), 125–133. <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/2797>

MOSCOSO, J. C. (2007). Obtención de compuestos de polipropileno reforzado con fibras de abacá mediante moldeo por compresión. Escuela de Ingeniería, 183.

NAVIA P, D. P., & VILLADA C, H. S. (2013). Impacto de la investigación en empaque biodegradables en ciencia, tecnología e innovación. In Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial (Vol. 11, Issue 2, pp. 173–180). Universidad del Cauca, Vicerrectoría de Investigaciones. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612013000200020&lng=en&nrm=iso&tlng=es

NAVIA P., D. P., VILLADA C., H. S., & AYALA A., A. A. (2013). EVALUACIÓN MECÁNICA DE BIOPLASTICOS SEMIRRÍGIDOS ELABORADOS CON HARINA DE YUCA. Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial, 11(SPE), 77–84. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612013000300009&lng=en&nrm=iso&tlng=es

NELVA, B., VILLANUEVA, E., ASESOR, M., ÁNGEL, I. M., & MORENO, M. (2016). “influencia de la adición de fibra de coco en la resistencia del concreto.”

Omrani, E., Menezes, P. L., & Rohatgi, P. K. (2016). State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. Engineering Science and Technology, an International Journal,

19(2), 717–736. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.10.007>

Ovalle Serrano, S. A., Blanco Tirado, C., & Combariza, M. Y. (2017). Exploring the composition of raw and delignified Colombian fique fibers, tow and pulp. <https://doi.org/10.1007/s10570>

Palechor Trochez, J. J. (2017). Biodegradación aerobia bajo condiciones controladas de compostaje de una película flexible y una bandeja semirrígida obtenidas a partir de almidón y harina de yuca. Repositorio Institucional, UNAL, 41–43. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59923>

Pasquini, D., Teixeira, E. de M., Curvelo, A. A. da S., Belgacem, M. N., & Dufresne, A. (2010). Extraction of cellulose whiskers from cassava bagasse and their applications as reinforcing agent in natural rubber. *Industrial Crops and Products*, 32(3), 486–490. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2010.06.022>

Prime, R. B., Bair, H. E., Vyazovkin, S., Gallagher, P. K., & Riga, A. (2009). THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS (TGA). In J. D. Menczel & R. B. Prime (Eds.), *Thermal Analysis of Polymers, Fundamentals and Applications* (Vol. 3, pp. 241–317).

Reichert, C. L., Bugnicourt, E., Coltelli, M.-B., Cinelli, P., Lazzeri, A., Canesi, I., Braca, F., Martínez, B. M., Alonso, R., Agostinis, L., Verstichel, S., Six, L., Mets, S. De, Gómez, E. C., Ißbrücker, C., Geerinck, R., Nettleton, D. F., Campos, I., Sauter, E., ... Schmid, M. (2020). Bio-Based Packaging: Materials, Modifications, Industrial Applications and Sustainability. *Polymers*, 12(7), 1558. <https://doi.org/10.3390/polym12071558>

Rivas-González, M., Méndez-Montevalvo, M. G. C., Sánchez-Rivera, M. M., Núñez-Santiago, M. C., & Bello-Pérez, L. A. (2008). Caracterización morfológica, molecular y fisicoquímica del almidón de plátano oxidado y lintnerizado. *Agrociencia*, 42(5), 487–497.

Rivera Cano, G. A. (2012). Inyección de compuestos plastificados a base de almidón de yuca y fibra celulósica. 65.

Rodríguez, L. J., Sarache, W. A., & Orrego, C. E. (2014). Compuestos de poliéster reforzados con fibra de plátano/banano (*Musa paradisiaca*) modificada químicamente. Comparación con fibra de vidrio y fique (*Furcraea andina*). *Informacion Tecnologica*, 25(5), 27–34. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000500005>

RODRÍGUEZ, E. y VÁZQUEZ, A. Propiedades mecánicas de materiales compuestos con fibras naturales obtenidos mediante la técnica de “VacumInfusion. Universidad de Mar del Plata: Argentina, 2003.

- Rua, J., Buchely, M. F., Monteiro, S. N., Echeverri, G. I., & Colorado, H. A. (2021). Impact behavior of laminated composites built with fique fibers and epoxy resin: a mechanical analysis using impact and flexural behavior. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.068>
- Ruiz, G. (2006). Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. *Ingeniería y Ciencia*, 2, 5–28.
- Salcedo, J. G., Figueroa, J., & Hernandez, E. J. (2017). *Agroindustria de productos amiláceos II: Métodos y técnicas de caracterización* (Issue November).
- Salvador, M. D., Amigó, V., Nuez, A., Sahuquillo, O., Llorens, R., & Martí, F. (2008). CARACTERIZACIÓN DE FIBRAS VEGETALES UTILIZADAS COMO REFUERZO EN MATRICES TERMOPLÁSTICOS. 4, 1–4.
- Senniangiri, N., Arunkumar, N., Dhanabal, A., Kamalakannan, K., & Thrisul, J. (2022). Production of polyethylene composites reinforced with sisal and jute fibres through compression molding. *Materials Today: Proceedings*, 68, 2362–2367. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.103>
- Singh, H., Inder Preet Singh, J., Singh, S., Dhawan, V., & Kumar Tiwari, S. (2018). A Brief Review of Jute Fibre and Its Composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(14), 28427–28437. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.129>
- Sreekumar, P.A., Albert, P., Unnikrishnan, G., Joseph, K. and Thomas, S. (2008), Mechanical and water sorption studies of ecofriendly banana fiber-reinforced polyester composites fabricated by RTM. *J. Appl. Polym. Sci.*, 109: 1547-1555. <https://doi.org/10.1002/app.28155>
- Suárez Castañeda, J. L., Restrepo Montoya, J. W., Quinchía Figueroa, A., & Mercado Navarro, F. A. (2017). Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica. *Revista Tecnura*, 21(51), 57. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.1.a04>
- Subramanian Senthilkannan, M. (2019). *Textile Science and Clothing Technology Green Composites Processing, Characterisation and Applications for Textiles*. <http://www.springer.com/series/13111>
- Teixeira, E. de M., Curvelo, A. A. S., Corrêa, A. C., Marconcini, J. M., Glenn, G. M., & Mattoso, L. H. C. (2012). Properties of thermoplastic starch from cassava bagasse and cassava starch and their blends with poly (lactic acid). *Industrial Crops and Products*, 37(1), 61–68. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2011.11.036>
- Tomczak, F., Sydenstricker, T. H. D., & Satyanarayana, K. G. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(7), 1710–1721.

<https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2007.02.004>

Vargas Ortiz, N. J., Villate Diaz, J. P., & Habran Esteban, N. M. (2021). Caracterización mecánica y determinación de la resistencia a la tracción de fibras de caña brava para uso en construcciones rurales. *INVENTUM*, 16(31), 78–84. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.16.31.2021.78-84>

Versino, F., & García, M. A. (2014). Cassava (*Manihot esculenta*) starch films reinforced with natural fibrous filler. *Industrial Crops and Products*, 58, 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.040>

Versino, F., & García, M. A. (2019). Particle Size Distribution Effect on Cassava Starch and Cassava Bagasse Biocomposites. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(1), 1052–1060. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04700>

Villada Castillo, Hector Samuel., Navia Porras, D. P., & Castañeda Niño, J. P. (2013). (12) United States Patent. (Patent No. US 9,109,116 B2). <https://doi.org/10.1080/1060>


Villada Castillo, Héctor Samuel. "Edición completa". *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial 21.1* (2023).

Zárate, C. N., Aranguren, M. I., & Reboledo, M. M. (2003). Influence of Fiber Volume Fraction and Aspect Ratio in Resol-Sisal Composites.

ANEXOS

Anexo A. Caracterización de materias primas

Figura 1. Análisis proximal afrecho de yuca

	 ASUBAGROIN		
Laboratorio De Biotecnología	Fecha de solicitud de análisis: 21/06/2022	Fecha de realización de análisis: 21/06/2022	Fecha de entrega de análisis: 28/06/2022
Solicitante de la prueba	Elsa Susana Cajiao Buitrón		
Analista	Qco. Lina Fernanda Restrepo Buesaquillo		
Prueba	Análisis proximal		
Método	AOAC 950.43; AOAC 920.153; AOAC 991.36; AOAC 968.06, AOAC 962.09.		
Guía número:	Consecutivo:	Modificado: SI: * NO:	
Modificación	La determinación de extracto etéreo se realizó durante 6 horas con éter de petróleo, utilizando equipos marca Raypa		
Identificación de la muestra	Muestra 1		
Condición de la muestra	Sólido		
Forma de muestreo	Cuarteo		

ANÁLISIS	RESULTADO (%)*
Humedad	11,5799±0,1843
Cenizas	1,1623±0,0968
Extracto Etéreo	0,9594±0,0437
Proteína total	0,6248±0,0002
Fibra cruda	13,0787±0,1838
Extracto libre de nitrógeno (ELN)	84,1748

Anexo B. Análisis de datos para el diseño de mezclas del material compuesto.

Figura 1. Prueba de normalidad para el módulo elástico

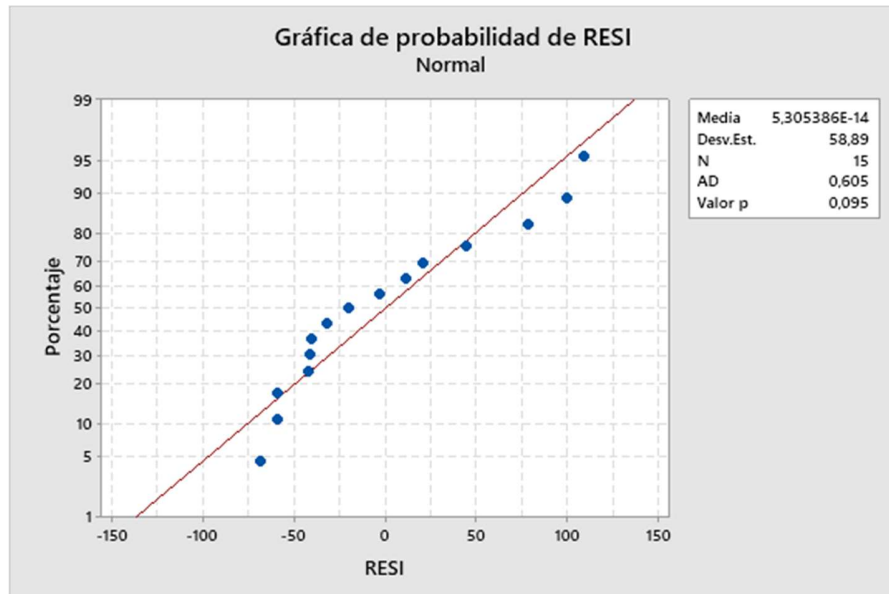


Tabla 1. Análisis de varianza para el módulo elástico

Análisis de varianza para M_elastic (proporciones del componente)

Fuente	GL	SC	Sec. SC	Ajust. MC	Ajust. Valor F	Valor p
Regresión	4	443692	443692	110923	22,84	0,000
Lineal	1	1321	56064	56064	11,55	0,007
Cuadrático	1	319931	54831	54831	11,29	0,007
Gel*Fibra	1	319931	54831	54831	11,29	0,007
Cúbico completo	1	64002	51870	51870	10,68	0,008
Gel*Fibra*(-)	1	64002	51870	51870	10,68	0,008
Inverso	1	58438	58438	58438	12,04	0,006
1/Gel	1	58438	58438	58438	12,04	0,006
Error residual	10	48557	48557	4856		
Total	14	492249				

Tabla 2. Resumen del modelo para el módulo elástico

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. PRESS	R-cuad. (pred)
69,6826	90,14%	86,19%	109252	77,81%

Figura 2. Prueba de normalidad para el porcentaje de deformación

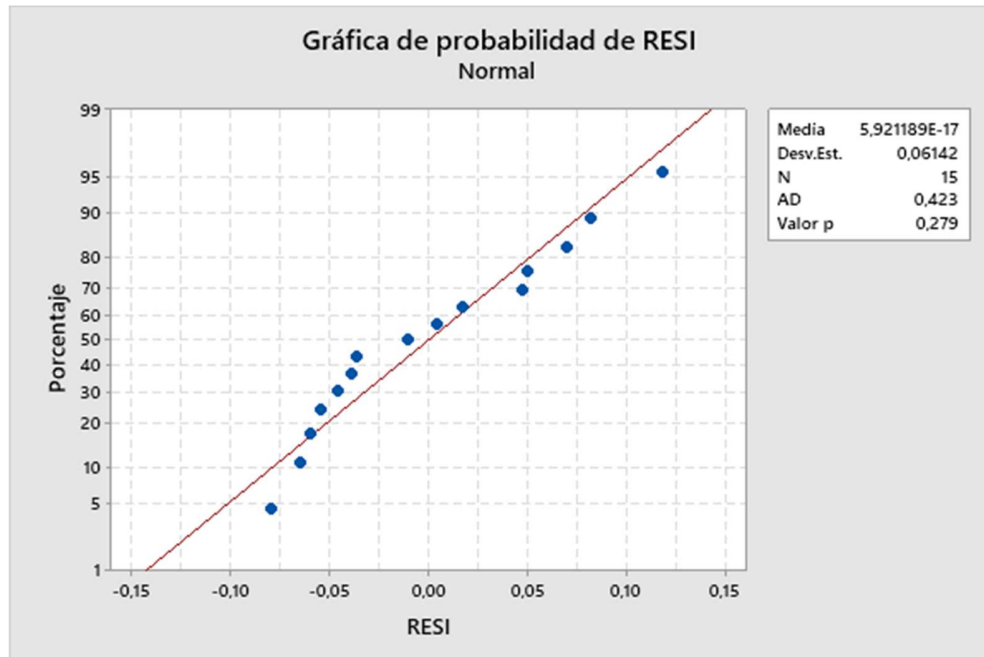


Tabla 3. Análisis de varianza para el porcentaje de deformación

Análisis de varianza para max_strain (proporciones del componente)

Fuente	GL	SC	Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	4	0,82691	0,82691	0,206727	39,15	0,000	
Lineal	1	0,24770	0,07806	0,078062	14,78	0,003	
Cuadrático	1	0,30110	0,06578	0,065784	12,46	0,005	
Gel*Fibra	1	0,30110	0,06578	0,065784	12,46	0,005	
Inverso	2	0,27811	0,27811	0,139053	26,33	0,000	
1/Gel	1	0,23740	0,08145	0,081454	15,42	0,003	
1/Fibra	1	0,04070	0,04070	0,040705	7,71	0,020	
Error residual	10	0,05281	0,05281	0,005281			
Total	14	0,87971					

Tabla 4. Resumen del modelo para el porcentaje de deformación

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	PRESS	R-cuad. (pred)
0,0726686	94,00%	91,60%	0,118816	86,49%

Figura 3. Prueba de normalidad para la fuerza máxima

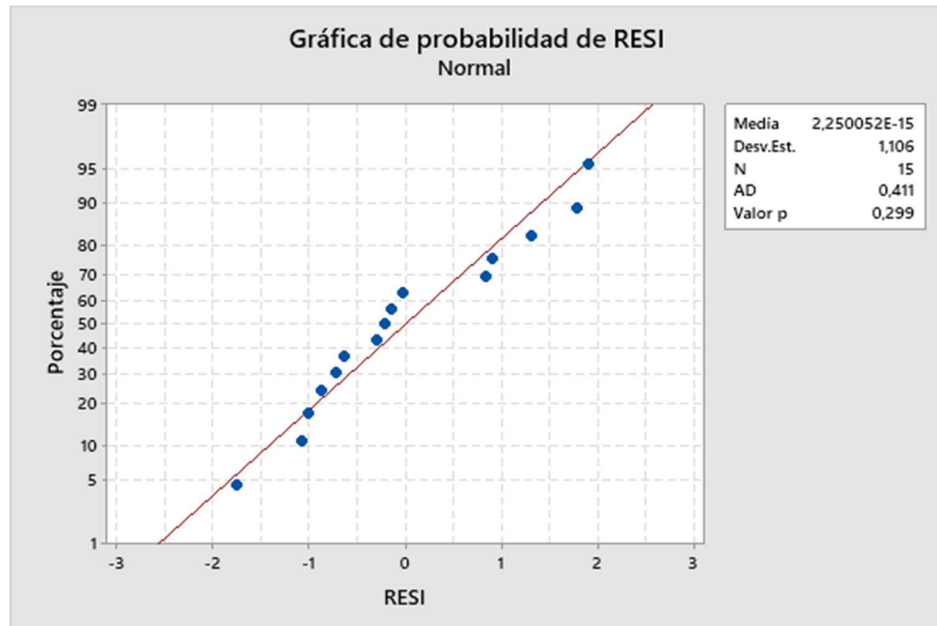


Tabla 5. Análisis de varianza para la fuerza máxima

Análisis de varianza para max_stress (proporciones del componente)

Fuente	GL	SC	Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	4	220,472		220,47	55,118	32,16	0,000
Lineal	1	0,746		29,36	29,360	17,13	0,002
Cuadrático	1	185,251		27,60	27,603	16,11	0,002
Gel*Fibra	1	185,251		27,60	27,603	16,11	0,002
Inverso	2	34,475		34,48	17,238	10,06	0,004
1/Gel	1	9,079		30,21	30,205	17,62	0,002
1/Fibra	1	25,396		25,40	25,396	14,82	0,003
Error residual	10	17,139		17,14	1,714		
Total	14	237,611					

Tabla 6. Resumen del modelo para la fuerza máxima

Resumen del modelo

S	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. PRESS	R-cuad. (pred)
1,30914	92,79%	89,90%	38,5617 83,77%

Anexo C. Prueba preliminar de germinación en campo.

Figura 1. Día 1 prueba de germinación.



Figura 2. Día 3 prueba de germinación.



Figura 3. Día 5 de germinación.



Figura 4. Día 7 de germinación.



Figura 5. Día 11 de germinación.



Figura 6. Día 12 germinación.



Figura 7. Día 15 de germinación.



Figura 8. Día 16 de germinación.

