

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIAL

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS FORMULADOS CON RESIDUOS DE LA INDUSTRIA ACEITERA Y RESINA ACRÍLICA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A TRACCIÓN DE COMPOSITES FORMULADOS CON RESIDUOS DE LA INDUSTRIA ACEITERA Y RESINA ACRÍLICA

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA**

MARÍA SOL CAMACHO JÁCOME

maria.camacho@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. VLADIMIR VALLE, M.Sc.

vladimir.valle@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, MARÍA SOL CAMACHO JÁCOME declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



MARÍA SOL CAMACHO JÁCOME

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MARÍA SOL CAMACHO JÁCOME, bajo mi supervisión.

LAURO VLADIMIR VALLE ALVAREZ
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.



MARÍA SOL CAMACHO JÁCOME

LAURO VLADIMIR VALLE ALVAREZ

DEDICATORIA

A mis padres, Yuri y Germania por ser mi pilar fundamental, por su apoyo incondicional, su paciencia y por todo el esfuerzo que han hecho para ayudarme a cumplir mis metas.

A mi hermano Nicolas por ser mi cómplice, que con su cariño y respaldo me ha ayudado a alcanzar mis objetivos.

A mis abuelitos, Fausto y Blanca quienes a lo largo de mi carrera y mi vida me han apoyado constantemente, han confiado en mí y me han dado la fortaleza para concluir esta meta.

A mi abuelita Clariza, quién me llena de fuerza para seguir adelante y me cuida desde el cielo.

AGRADECIMIENTO

Germania y Yuri por ser mi soporte día a día, quienes desde lejos me brindaron su apoyo, sus palabras de aliento que me llenaban de seguridad y valor para no rendirme nunca. Por siempre confiar en mí y hacer todo lo posible para darme la oportunidad de estudiar y cumplir una de mis metas. Nicolas, quién me ha consentido y con sus consejos me ha ayudado a crecer con fortaleza mental y emocional para afrontar las dificultades que se han presentado en este camino. Walter, gracias por tu amor y tu cariño, por alentarme a continuar y por demostrarme que con esfuerzo podemos lograr todo lo que queramos.

A mis abuelitos, Fausto y Blanca quienes nunca dudaron en brindarme su apoyo total desde que inicié mi carrera, por confiar en mí y siempre demostrarme que están orgullosos de quién soy, por todo su amor y porque sin ellos esto no hubiese sido posible. A toda mi familia, quienes me apoyaron y respaldaron para ir a vivir a otra ciudad y confiaron en mí. A Sandri, tía Susy, tía Meri por todo su apoyo desde que inicié. A Nathy y Esteban que nunca me han dejado sola y me han apoyado, gracias por todos sus consejos y cariño. Josy, gracias por el cariño, por el tiempo juntas y por los buenos momentos.

A mis amigos Karo y John, ha sido un privilegio coincidir con personas tan buenas e incondicionales. Karo, gracias por todas las risas, por la paciencia, por tu amistad, por todas las horas y días de consejos, por no dejarme sola jamás y por todo el cariño. John, gracias por haberme apoyado siempre, por alentarme día a día y por todos tus consejos. Ustedes se convirtieron en una familia para mí.

A Vladi, por ser un gran maestro y amigo, por las enseñanzas, por ser mi tutor y guiarme con paciencia para finalizar este trabajo. Dr. Cadena gracias por permitirme formar parte de la familia del CIAP, por los gratos momentos, por su amistad y por todos sus consejos.

Finalmente, pero no menos importante, a mi amado benito, por ser mi compañía día a día, por las noches de vela que compartimos juntos, por su amor, su calor, su delicadeza y sobre todo por ser mi mejor amigo gatuno.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VII
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	2
2. METODOLOGÍA.....	10
2.1 Diseño	10
2.2 Elaboración del material compuesto	11
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	12
3.1 Resultados	12
3.2 Conclusiones	24
3.3 Recomendaciones	25
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
5. ANEXOS.....	38
ANEXO I.....	37

RESUMEN

El presente proyecto se enfocó en la caracterización del material compuesto elaborado con residuos industriales de raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) y resina acrílica termoplástica base acuosa. A partir de los datos proporcionados de longitud de fibra se determinó un método estadístico descriptivo por medio del análisis de normalidad del conjunto de datos. De igual manera, con los datos proporcionados de esfuerzo y deformación, se determinó la resistencia a tracción, módulo de elasticidad y porcentaje de elongación, estos valores fueron analizados para evaluar la influencia de la temperatura de procesamiento sobre estas propiedades mecánicas antes y después del estudio de intemperismo acelerado. El componente se realizó por medio de un enfoque cuantitativo, el tipo de investigación fue exploratorio y la técnica de recolección utilizada fue por medio de la información obtenida del ensayo a tracción. Las técnicas utilizadas para el análisis de los datos de longitud de la fibra fueron los métodos de análisis estadísticos clásicos y robustos. La longitud promedio determinada fue de 728,8 μm , la cual se obtuvo por medio del método estadístico de bioponderado de turkey debido a su gran robustez. Para determinar si los valores obtenidos de resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y porcentaje de elongación son bajos o altos, se compararon con los datos de las propiedades mecánicas de otros materiales compuestos como, el ácido poliláctico reforzado con fibra basáltica, el poliéster reforzado con fibra de sisal, poliéster reforzado con fibra de bambú y epoxi con fibra de plátano. De tal manera, en el análisis de las propiedades mecánicas se evidenció que antes del intemperismo los valores de resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y porcentaje de elongación fueron bajos debido a la ineficiente adhesión entre la fibra y la matriz. Por otro lado, la resistencia y el módulo de elasticidad antes del intemperismo disminuyeron conforme aumentó la temperatura de fabricación del material; sin embargo, después del intemperismo ocurrió lo contrario, estos valores aumentaron conforme se incrementó la temperatura de fabricación del composite. Con respecto al porcentaje de elongación, antes y después del intemperismo, a partir de 120°C este valor se incrementó conforme se incrementó la temperatura de fabricación del material.

PALABRAS CLAVE: raquis, fibra, ensayo de tracción, composite, propiedades mecánicas.

ABSTRACT

The present project focused on the characterization of the composite material made from African palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) rachis industrial residues and water-based thermoplastic acrylic resin. From the fiber length data provided, a descriptive statistical method was determined by means of the normality analysis of the data set. Similarly, with the stress and strain data provided, tensile strength, modulus of elasticity and elongation percentage were determined, these values were analyzed to evaluate the influence of processing temperature on these mechanical properties before and after the accelerated weathering study. The component was carried out by means of a quantitative approach, the type of research was exploratory and the collection technique used was the tensile test. The techniques used for the analysis of the fiber length data were classical and robust statistical analysis methods. The average length determined was 728.8 μm , which was obtained by means of the turkey bioweighting statistical method due to its high robustness. To determine whether the obtained values of tensile strength, modulus of elasticity and percentage of elongation are low or high, they were compared with the mechanical property data of other composite materials such as basaltic fiber reinforced poly lactic acid, sisal fiber reinforced polyester, bamboo fiber reinforced polyester and banana fiber reinforced epoxy. Thus, in the analysis of the mechanical properties, it was evidenced that before weathering, the values of tensile strength, modulus of elasticity and percentage of elongation were low due to the inefficient adhesion between the fiber and the matrix. On the other hand, the strength and modulus of elasticity before weathering decreased as the manufacturing temperature of the material increased; however, after weathering the opposite occurred, these values increased as the manufacturing temperature of the composite increased. With respect to the percentage of elongation, before and after weathering, from 120°C this value increased as the manufacturing temperature of the material increased.

KEYWORDS: rachis, fiber, tensile test, composite, mechanical properties.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En las últimas décadas el empleo de plásticos ha aumentado rápidamente y ha ganado mayor importancia debido a la gran cantidad de ventajas que posee como, su bajo costo, su larga vida útil y las excelentes propiedades que posee; sin embargo, son productos que no se degradan fácilmente por lo que genera preocupaciones ambientales (Yee et al., 2016). En este contexto, el incremento de conciencia ambiental ha generado un gran interés por nuevos materiales, es así como se han llevado a cabo diversos estudios sobre composites de matriz polimérica con refuerzos de fibras naturales (Mohit & Arul Mozhi Selvan, 2018).

Entre los polímeros utilizados para la fabricación de materiales compuestos destacan el poliéster, la resina epoxi y la resina acrílica que generalmente se presenta como un material termoestable (Matadi Boumbimba et al., 2017). En otro aspecto, el uso de fibras naturales se ha destacado por su gran versatilidad de propiedades, su renovabilidad y biodegradabilidad. Adicionalmente, dentro de la industria satisface el interés económico por su bajo costo (Murugesan et al., 2021). Las fibras naturales pueden ser obtenidas de diversas fuentes y el principal recurso de fibras son las plantas de las cuales se utiliza el tronco, las hojas, el fruto, entre otros (Djoudi et al., 2021).

En Ecuador existen alrededor de 280 mil hectáreas de cultivos de palma africana y acrece 7% cada año, el uso industrial de la palma africana en el país es la obtención de aceite y se valora que en los últimos 5 años Ecuador ha exportado el 58% del aceite producido (Ministerio de Producción Comercio Exterior Inversiones y Pesca, 2017). El proceso de extracción de aceite genera una gran cantidad de desechos entre los cuales destaca, el raquis o racimo de frutas vacío (Murugesan & Poomaruthai, 2017).

Se considera que a nivel mundial se generan 83 millones de toneladas de desechos de palma aceitera africana al año y que en el 2020 incrementó un 40% (Taiwo et al., 2017). Así mismo, en Ecuador el proceso de extracción genera aproximadamente 6872469,00 toneladas al año de residuos de la palma, de las cuales 825.600 toneladas por año corresponden al raquis. En este sentido, entre las diferentes opciones de aprovechamiento del raquis se encuentra el desarrollo de materiales compuestos (Yani et al., 2019).

Con los antecedentes expuestos, el presente trabajo se basa en la caracterización a tracción de materiales compuestos elaborados con residuos industriales de raquis de palma africana (*Elaeis guineensis Jacq.*) y resina acrílica termoplástica en base acuosa.

1.1 Objetivo general

Caracterizar, mediante ensayo a tracción, materiales compuestos elaborados con fibra de raquis de palma africana y resina acrílica termoplástica en base acuosa.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar un valor promedio de la longitud de fibra molida empleada para la elaboración del material compuesto, a partir del análisis estadístico descriptivo.
- Definir el estado del arte de la temática a estudiar, a partir de una revisión bibliográfica rigurosa sobre composites de matriz polimérica y refuerzo lignocelulósico.
- Determinar la influencia de la temperatura de procesamiento en la resistencia a la tensión, módulo de elasticidad y porcentaje de elongación del composite, antes y después del intemperismo.

1.3 Alcance

En el desarrollo del componente se llevó cabo la caracterización del material compuesto de acuerdo con los siguientes agregados:

1. Mediante la revisión bibliográfica de los métodos de análisis estadísticos se determinó el método adecuado para la obtención del valor promedio de la longitud de fibra que se ha empleado para la elaboración del material.
2. Sobre la base de la recopilación, organización y análisis de información, se discutió la influencia de la temperatura e intemperismo en los resultados obtenidos de la caracterización mecánica de los materiales compuestos.
3. Elaboración del trabajo de integración curricular, presentación y el poster resumen del trabajo de socialización.

1.4 Marco teórico

Materiales compuestos

Debido a la necesidad de relación resistencia/peso de los materiales que se usan dentro de la industria automovilística, de construcción, electrónica, espacial, entre otras; se han desarrollado diversos materiales compuestos que garantizan alto rendimiento (Dinakaran et al., 2019). Un material compuesto es aquel que posee dos componentes con diferentes o similares propiedades y están compuestos por un material base también conocido como matriz aglutinante que puede ser polimérica, cerámica o metálica (Jain et al., 2019) y de un

material de refuerzo que una de sus funciones principales es absorber las tensiones y se utiliza para conferir al material aglutinante o matriz una propiedad que no posee (Muralidhar et al., 2020)

Material base

La matriz cumple un papel fundamental en los materiales compuestos (Tian et al., 2016) debido a su capacidad de transferir la carga al refuerzo del material para aportar con resistencia mecánica (Oushabi et al., 2017). Entre las matrices utilizadas en materiales compuestos se encuentran las poliméricas (Zainol Abidin et al., 2019); sin embargo, todos los materiales base, entre ellos los polímeros podrían presentar dificultades con relación a la microestructura y funcionalidad.

Por lo tanto, el uso de matrices reforzadas como las poliméricas podrían contribuir a obtener propiedades mecánicas necesarias (Gholampour & Ozbakkaloglu, 2020), por ejemplo, la poliamida utilizada en la industria automotriz posee gran rigidez y resistencia, pero absorbe el agua de su entorno, por lo que es necesario reforzar el material con fibras, en este caso pueden ser fibras de vidrio o de carbono (Mazur et al., 2019).

Las matrices poliméricas se clasifican en termoplásticas, termoestables y elastómeros (Singh et al., 2019), la resina bioepoxi es un ejemplo de matriz termoestable que a diferencia de las resinas tradicionales están formadas de biomasa (Mora Espinosa et al., 2019). Las resinas acrílicas tienen una alta rigidez y excelentes propiedades de adhesión, además, su resistencia térmica y su estabilidad son óptimas, pero tienen un inconveniente que podría limitar su uso en la industria y es su alta fragilidad (Rashid et al., 2017). Por otro lado, el uso de resinas acrílicas puede desencadenar problemas de impregnación del refuerzo en la matriz debido a la alta viscosidad de fusión que posee (Pini et al., 2017).

Por lo regular, las resinas acrílicas son termoestables, pero para materiales compuestos se podría utilizar resinas acrílicas adaptadas al campo de los termoplásticos, con la finalidad de conseguir un material que posibilite su termo conformado, su reciclaje y su reprocesamiento (Bel Haj Frej, Léger, Perrin, & Ienny, 2021). Cabe considerar que la adaptación de las resinas acrílicas en termoplástico también permite su moldeo por técnicas como la infusión, pultrucción o laminado manual. Otra ventaja de las resinas acrílicas termoplásticas, según *Andrade Raponi et al* es que su naturaleza es líquida a temperatura ambiente y posee una baja viscosidad entre (100 - 200 mPa.s), por lo que la impregnación en materiales compuestos es más alta y su uso dentro de la industria se potencializa (Andrade Raponi et al., 2018).

El uso de las resinas acrílicas termoplásticas en materiales compuestos tiene varias ventajas entre ellas, el bajo consumo energético (Yerro et al., 2016), varias investigaciones han sido enfocadas en la comparación de las resinas acrílicas termoplásticas con otro tipo de resinas, con la finalidad de determinar las ventajas de usar la resina acrílica. Por ejemplo, se ha determinado que las propiedades mecánicas de las resinas termoplásticas son 33% mayores a los tradicionales epoxis debido a su mayor deformación plástica (Obande et al., 2019).

En otro aspecto, varias investigaciones se han centrado en analizar el envejecimiento de las resinas acrílicas termoplásticas, de modo que el estudio de envejecimiento de estas resinas en medios hidrotermales realizado por (Bel Haj Frej, Léger, Perrin, & Lenny, 2021), demuestra que la durabilidad de este material en medio hídrico hasta 40°C en envejecimiento acelerado, se debe a la longitud de la cadena polimérica y su peso molecular. Por otra parte, con respecto al comportamiento a la fractura de las resinas acrílicas termoplásticas, según *Pini et al* la resistencia a la fractura de estas resinas depende directamente de la cantidad de relleno (Pini et al., 2018).

Finalmente, según *Bel Haj Frej, Léger, Perrin, Lenny, et al* las resinas acrílicas termoplásticas tienen una mayor compatibilidad con la fibra de carbono en un material compuesto que las resinas tradicionales; sin embargo, si existiese incompatibilidad de la matriz con un refuerzo en especial se puede utilizar un compatibilizante, el cual le da una mayor adherencia (Bel Haj Frej, Léger, Perrin, Lenny, et al., 2021).

Material de refuerzo

El refuerzo se puede presentar dentro del composite como fragmentos, partículas o fibras (Rajak et al., 2019). Las fibras sintéticas más utilizadas como material de refuerzo son las fibras de vidrio, fibras de carbono, fibras cerámicas y fibras metálicas (Sanjay et al., 2018), mientras que las fibras naturales regularmente empleadas, se obtienen del algodón, sisal, bambú, raquis de la palma datilera o aceitera africana, cáñamo y del tallo del maíz (Jenish et al., 2020). Las fibras naturales por lo común se componen de celulosa, hemicelulosa o lignina que son polímeros naturales multifuncionales y son extraídas de las hojas, los tallos, del fruto o de las semillas de las plantas (Alshammari et al., 2019)

Actualmente, la investigación se ha inclinado a las fibras naturales como refuerzos de matrices poliméricas debido a que es una opción extraordinaria frente a la biodegradabilidad de los materiales compuestos (Al-Otaibi et al., 2020). Las fibras naturales son refuerzos poliméricos compostables, por lo tanto, han ganado una consideración

significativa en las aplicaciones industriales. Además, su uso genera medios de trabajo en comunidades de escasos recursos que poseen cultivos de plantas (Obada et al., 2020). De igual manera, el impacto ambiental del uso de fibras sintéticas genera una gran problemática medioambiental, por lo que la estricta legislación ambiental, como también la necesidad de implementar rentabilidad en la industria, ha llevado al uso fibras naturales (Kumar & Anand, 2019).

No obstante, el uso de las fibras naturales puede desencadenar desventajas como la alta absorción de humedad o la baja estabilidad térmica (Saba et al., 2017), esto depende de la fibra utilizada, de modo que en estos casos se usa una combinación de fibras que contrarresten los inconvenientes de cada tipo de fibra (Sathees Kumar et al., 2021). Según *Djoudi et al* una de las fibras naturales comúnmente utilizada en materiales compuestos es extraída de la palma debido a su bajo costo, a su abundante disponibilidad y sus buenas propiedades, entre ellas su baja densidad (Djoudi et al., 2021).

En este contexto, los residuos de la extracción de aceite se pueden obtener de diferentes especies de palmas se encuentran la palmera datilera, de coco, de aceite, entre otras y es importante mencionar que, en su cultivo y recolección, se generan diversos residuos los cuales podrían llegar a ser contaminantes para el medio ambiente, pero pueden ser utilizados para producir materiales de bajo costo que aporten a la sostenibilidad del medio ambiente (Al-Otaibi et al., 2020).

La palma aceitera africana (*Elaeis guineensis* Jacq) está constituida de raquis, tronco, cascara de palmiste, fibra de mesocarpio y hojas de palma. Como se puede ver en la Figura 1.4.3.1 el proceso de extracción de aceite del racimo de fruta fresca genera aceite de palma, cascara de palmiste, efluente del proceso de extracción de aceite, biomasa del racimo de frutas vacío, fibra de mesocarpio y palmiste (Onoja et al., 2019). Esta biomasa tiene un extenso uso dentro de la industria como la elaboración de papel, abono, combustible para calderas, material de construcción para vías, entre otros (Pinto-Flórez et al., 2019). El 73% de la fibra que se puede extraer se encuentra en el raquis o racimo de fruta vacío.

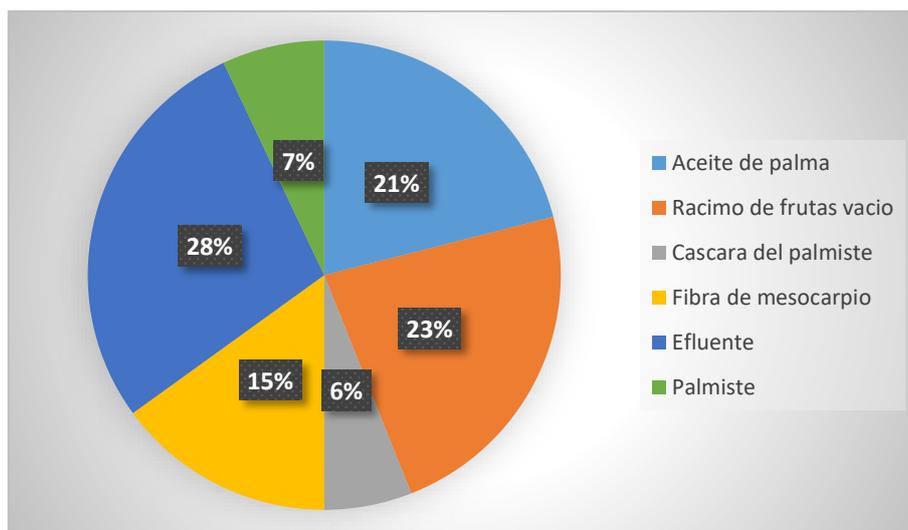


Figura 1.4.3.1 Composición de la biomasa generada a partir del proceso de extracción de aceite (Onoja et al., 2019).

Según *Ng et al* (Ng et al., 2021) el raquis es un residuo sólido que posee una masa aproximada de 3,50 kg, una humedad entre 2,40% y 14,28% y sus dimensiones son alrededor de 130 mm de grosor, 300 mm de largo y 300 mm de ancho. En la Tabla 1.4.3.1 se presenta la composición química del raquis en la cual se indica que la celulosa y hemicelulosa se presentan en mayor porcentaje; sin embargo, cambia su composición de celulosa según el medio en el que se encuentre (Ng et al., 2021).

Tabla 1.4.3.1 Composición química del raquis

Porcentaje en peso del análisis basado en base seca		Porcentaje en peso del análisis final basado en base seca y sin cenizas		Porcentaje en peso de la composición química en base seca	
Materia volátil	70,03–83,86	Carbono (C)	43,80–54,76	Celulosa	23,70–65,00
Carbono fijo	8,97–18,30	Hidrógeno (H)	4,37–7,42	Hemicelulosa	20,58–33,52
Ceniza	1,30–13,65	Oxígeno (O)	38,29–47,76	Lignina	14,10–30,45

		Nitrógeno (N)	0,25-1,21	Extractivo	3,21-3,70
		Azufre (S)	0,03-1,10		

(Ng et al., 2021)

En la composición del raquis también se encuentra lignina que es un compuesto lignocelulósico altamente utilizado en la industria como agente emulsionante y estabilizante (Sekeri et al., 2020). En este contexto, las fibras de raquis poseen una alta resistencia mecánica y un rendimiento similar a la fibra del coco y su característica fundamental es su alto contenido de celulosa, razón por la cual es altamente utilizada en composites plásticos (Ghazilan et al., 2017).

En el estudio sobre la morfología de las fibras del raquis realizado por *Khan et al* (Khan et al., 2020), se determinó que la longitud de la fibra de la parte media del raquis es menor a la longitud de las fibras que se encuentran en las regiones basales o terminales del raquis. Otra característica importante de la fibra es su alta capacidad absorbente (Ighalo et al., 2020), además, se puede usar como materia prima para la obtención de biocarbón (Adedeji, 2020).

Finalmente, en el análisis de la degradación térmica de las fibras realizado por *Nordin et al* (Nordin et al., 2016) se encontró que, entre 150°C a 250°C se despolimerizaron la celulosa y la hemicelulosa, es decir, las fibras del raquis son estables hasta los 150°C. Adicionalmente, (Cabrales et al., 2020) determinó que las propiedades mecánicas y térmicas de las fibras dependen de varios factores entre ellos, la longitud y el contenido de humedad. Por otro lado, indica que la fibra posee una densidad de 934,4 kg/m³, una resistencia a la tracción de 44,54 KN y el contenido máximo de humedad para mantener la durabilidad y resistencia de la fibra es de 8,4%.

Caracterización

Según *J. Li et al* comprender la fibra, sus propiedades estructurales, mecánicas y su morfología, potencializa el conocimiento de la misma como refuerzo en los compuestos y facilita su uso dentro de la industria (J. Li et al., 2020). Por otro lado, la caracterización de los materiales compuestos se realiza por diversos procedimientos, los cuales se llevan a cabo con los parámetros establecidos en las normas adecuadas para cada ensayo (Rajak et al., 2021). En la Tabla 1.4.4.1 se presentan los procedimientos y las normas

generalmente utilizadas para estos. La información detallada de cada procedimiento se presenta en el Anexo 1.

Tabla 1.4.4.1 Procedimientos de caracterización y normas generalmente utilizadas

Procedimiento de Caracterización	Norma	Referencia
Morfología	ISO 4049:2009	(Mahdi et al., 2021)
Hinchazón del espesor y absorción de agua	ASTM-D 570-98	(Supian et al., 2021)
Análisis termogravimétrico	ASTM D1076	(Medupin et al., 2017)
Análisis por FTIR	ASTM D 5379	(Otto et al., 2017).
Ensayo de flexión	ASTM D790	(Gheith et al., 2019)
Ensayo a tracción	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM D3039 • ASTM D638 	(Ramnath & Sankar, 2019)

En la Tabla 1.4.4.1 se presentan ensayos que se realizan en la caracterización mecánica, como el ensayo de flexión y a tracción. Por otro lado, la caracterización mecánica de la fibra es muy importante para analizar de mejor manera su conducta en la matriz (Chauhan et al., 2018). Con respecto a la caracterización mecánica, el ensayo de flexión determina los puntos máximos de rotura y el esfuerzo en las deformaciones por medio del doblamiento de la muestra (Alarifi, 2021).

En cuanto al ensayo a tracción, este se encarga de medir la fuerza necesaria para que el material reforzado se rompa, como también la capacidad de estiramiento o alargamiento de la muestra hasta llegar a su punto de rotura (Aje et al., 2017). La caracterización a tracción es el ensayo más importante dentro de la industria debido a que este procedimiento puede determinar el potencial uso del material por su resistencia y dureza (Sanjay et al., 2016). En la caracterización a tracción se determina la resistencia a la tracción, el módulo de Young y la deformación máxima (Mahesha et al., 2017), con los que se realizan graficas de tensión – deformación que muestran regiones diferentes como deformaciones y comportamientos lineales. (Kazemi et al., 2020).

Por ejemplo, según *Valle et al* por medio de la caracterización a tracción a una velocidad de 50 mm/min con base en la norma ASTM D638 determinaron que el módulo de tracción aumentó en función de la adición de fibra de palma debido a su gran rigidez, pero la resistencia a la tracción disminuyó debido a las impurezas y las roturas de los extremos que se causaron en la deformación (Valle et al., 2021). De igual manera (Kar et al., 2018) determinó que al usar polvo de fibra de palma en lugar de la fibra completa en matriz epoxi la resistencia a la tracción y a la flexión disminuyeron debido a la ineficaz unión entre las partículas y el material aglutinante, lo cual causó micro fisuras en la interface. En particular, para un material compuesto de resina epoxi reforzado con fibra de racimo de frutas vacío de la palma africana la resistencia a la tracción disminuyó desde 25.89 MPa hasta 10.06 MPa (Ghazilan et al., 2017).

Sin embargo, mediante el ensayo a tracción, en varias investigaciones se ha determinado el incremento de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos por la adición de fibras naturales, por ejemplo, según *Dunne et al* la adición de 10% de fibra de palma aumenta la resistencia a la tracción un 10% (Dunne et al., 2017). De igual manera, según *Nasihatgozar y colaboradores* un 30% de fibra de latania en una matriz de polipropileno aumenta la resistencia hasta un 20% (Nasihatgozar et al., 2016). Según *Espinach et al* existe una mejora de la resistencia a tracción hasta un 29% en los compuestos de polioximetileno reforzados con fibras blanqueadas de eucalipto (Espinach et al., 2017). Pero en particular para un material compuesto de resina epoxi con fibras de raquis de palma africana no se observa un incremento de las propiedades mecánicas (Ghazilan et al., 2017).

Por otro lado, uno de los métodos para complementar la caracterización a tracción, es la microscopía electrónica de barrido. Por ejemplo, mediante el microscopio electrónico de barrido en la caracterización de una muestra de polihidroxiclcanoato reforzado con fibra de palma, se determinó que la resistencia a tracción disminuyó debido a que la matriz no cubrió completamente la fibra lo cual limitó la adhesión entre ambas (Wu et al., 2017). Por otro lado, con referencia a otros métodos para complementar la caracterización de propiedades mecánicas (Ivey et al., 2017) analizó los resultados del ensayo a tracción mediante un sistema de extensometría óptica que mide la deformación de las muestras durante el ensayo.

2 METODOLOGÍA

2.1 Diseño

Para la presente investigación se ha realizado un estudio que abarca el análisis de un conjunto de datos obtenidos de pruebas experimentales. Por lo tanto, se explican los pasos y aspectos utilizados para la caracterización. Dentro de los aspectos más importantes para una investigación se encuentra el enfoque utilizado para realizar el trabajo, según *Strijker et al* el enfoque es un proceso controlado relacionado con los tipos y métodos de investigación dentro de un proceso disciplinado y sistemático, estos enfoques pueden ser cualitativos o cuantitativos (Strijker et al., 2020).

El presente componente ha sido realizado por medio de un enfoque cuantitativo debido a su determinación y estudio por medio de datos recolectados de una ardua experimentación. Por otro lado, el tipo de trabajo de este componente es exploratorio ya que se realiza con una perspectiva científica de un conjunto de datos medidos, esta investigación es la más utilizada por el método cuantitativo de estudio (Correa et al., 2017). En el mismo orden de ideas, se establece que la técnica de recolección utilizada ha sido fue por medio de la información obtenida específicamente del ensayo a tracción, el cual se basa en colocar una muestra fabricada en una máquina que aplica un esfuerzo axial hasta producir la rotura de la muestra (Hanipah et al., 2017). El ensayo a tracción proporciona datos de esfuerzo aplicado y el porcentaje de deformación.

Finalmente, las técnicas utilizadas en el trabajo fueron:

- Para el análisis de los datos de longitud de la fibra, se han utilizado métodos de análisis estadísticos, entre ellos, el histograma, la media, media aritmética, mediana, entre otros; sin embargo, la distribución de los datos llevó a utilizar métodos robustos para una mayor exactitud como es estimador de Huber, el estimador de Hampel, el biponderado de tukey, la onda de Andrews, entre otros.
- Para el análisis de los datos obtenidos del ensayo a tracción se utilizó la regresión lineal y ecuaciones indicadas para cada resultado esperado. También se utilizaron gráficos para analizar el comportamiento y la tendencia de cada propiedad de la probeta utilizada en el ensayo.

2.2 Elaboración del material compuesto

Pretratamiento y embebido de la fibra

Las fibras fueron extraídas del raquis por medio de cortes manuales del residuo y luego fueron secadas a temperatura ambiente. Una vez que las fibras se secaron fueron procesadas en un molino de cuchillas para obtener fibras más cortas, 200 fibras fueron medidas y paso seguido las fibras se secaron a 103°C durante 3 horas para después ser embebidas en resina acrílica termoplástica durante 30 minutos por agitación mecánica. Posteriormente, las fibras embebidas fueron secadas nuevamente a 103°C durante 3 horas.

Moldeo por compresión

Las fibras fueron colocadas de manera homogénea en el molde para luego ser compactadas. Para el proceso del prensado, primero se realizó el precalentamiento de los platos durante 15 minutos a 80°C para luego comprimir las muestras en los moldes durante 40 minutos con 150 bares de presión. El proceso se repitió, por separado, a 100°C, 120°C, 140°C y 160°C. Finalmente, se enfrió el molde a 85 bares durante 5 minutos.

Intemperismo acelerado

Las muestras de material compuesto obtenidas del moldeo por compresión fueron sometidas a intemperismo en la cámara salina con una concentración en peso de 6% de solución NaCl durante 330 horas.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Análisis Estadístico

Las fibras poseen diversas longitudes debido a que posterior a la reducción de tamaño no fueron tamizadas (Apoveda et al., 2019). Debido a la variación de longitudes de la fibra de palma, a continuación, se estimará la longitud promedio de la fibra. Para la estimación de la longitud promedio a partir de los datos de longitud de fibra, primero se ha determinado la distribución que posee el conjunto de datos para analizar si existe normalidad. Para su determinación se ha utilizado un histograma que se presenta en la Figura 3.1.1.1

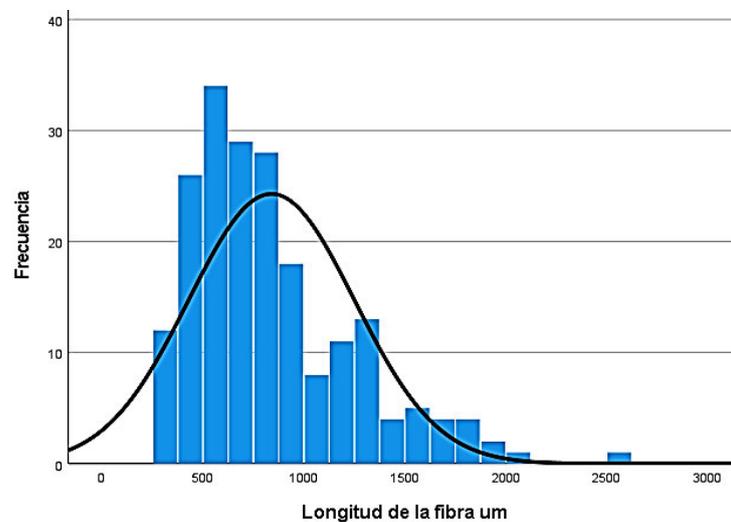


Figura 3.1.1.1. Histograma: Distribución de los datos

Un histograma realizado con base en un conjunto de datos debe presentar forma de campana simétrica a la media para demostrar normalidad (Mishra et al., 2019); sin embargo, como se puede observar en la Figura 3.1.1.1 no existe una distribución normal de los valores debido a que hay una mayor cantidad de cifras superiores a la media que datos menores a esta, es decir la asimetría es positiva porque la cola de números en la distribución se alarga a los valores superiores (Billat et al., 2019). Estos valores superiores se encuentran muy desplazados dentro del nivel de la serie y se consideran como valores atípicos (Kwak & Kim, 2017).

De igual manera, en la Tabla 3.1.1.1 se observa que la media, la mediana y la moda no coinciden, por lo que se confirma la anormalidad en el conjunto de datos.

Tabla 3.1.1.1. Estadísticos de tendencia central de la distribución

Método Clásico	Longitud [μm]
Media	839,50
Mediana	737,00
Moda	855,00

El desplazamiento de datos se demuestra con el valor de desviación estándar de 410,57 μm , el cual refleja un alto grado de dispersión de los valores. Los datos atípicos pueden ser eliminados por medio de un mecanismo estadístico para obtener una distribución normal (Kwak & Kim, 2017); sin embargo, no es una solución viable ya que no representaría una variación real de las longitudes de las fibras y este error ocasionaría que la caracterización del material se vea afectada, ya que la misma depende del comportamiento de las fibras ante parámetros importantes como la temperatura.

Dado la asimetría de la distribución, se han utilizado diferentes métodos para estimar la media del conjunto de datos, como los métodos estadísticos clásicos que generalmente son empleados cuando la distribución es normal y los estimadores robustos son utilizados para distribuciones anormales debido a que con este método la media no se ve afectada por la existencia de valores atípicos dentro del conjunto de datos (Kitchenham et al., 2017).

En la Tabla 3.1.1.2 se presentan los valores de medias determinados por diferentes métodos clásicos.

Tabla 3.1.1.2. Estadísticos de tendencia central con métodos clásicos

Método Clásico	Longitud [μm]
Promedio aritmético	839,50
Mediana	737,00
Promedio aritmético con datos agrupados	844,40
Mediana datos agrupados	734,90

En este contexto, los métodos clásicos son excelentes estimadores cuando la distribución de los datos es normal y simétrica; no obstante, se ven afectados ante la existencia de datos atípicos o *outliers*. De tal manera, una mejor aproximación es agrupar los datos, obtener la media, la mediana y compararlas (Rosadi et al., 2020).

Con la ecuación [3.1.1.1] se obtuvo que la diferencia entre los valores de longitud media obtenida con datos no agrupados y con datos agrupados es de 0,59%. Esta baja diferencia demuestra que no existe gran variación del valor si se agrupan los datos y se obtiene su frecuencia, es decir el método de agrupación de datos tampoco refleja robustez.

$$\text{Porcentaje de diferencia} = \frac{|Valor\ 1 - Valor\ 2|}{\frac{(Valor\ 1 + Valor\ 2)}{2}} \quad [3.1.1.1]$$

Por otro lado, las medianas obtenidas representan el punto medio del conjunto de datos, de tal manera que su valor se desplaza según la cantidad de datos (Fabián, 2021) y se ve afectada ante la existencia de valores atípicos. Con esto se concluye que ningún método clásico puede ser utilizado para determinar la longitud media de la fibra (Zhang, 2016).

Tabla 3.1.1.3 Estadísticos de tendencia central con métodos estadísticos robustos

Tabla de Medias	
Método Robusto	Longitud [µm]
Media Recortada	833,90
Media armónica	674,10
Media Geométrica	751,30
Trimedia	763,70
SPSS Estimador M de Huber	761,30
SPSS Estimador M de Hampel	767,20
SPSS Bioponderado de Tukey	728,80
SPSS Onda de Andrews	728,00

Por otra parte, la Tabla 3.1.1.3 presenta longitudes medias calculadas con métodos estadísticos robustos. Es importante tomar en cuenta que, la media recortada, media armónica y media geométrica son los métodos menos robustos descritos en la tabla.

La media recortada consiste en un promedio de los valores centrales y elimina los valores atípicos o desplazados de la serie, este método ignora los datos extremos por lo que afecta el valor real de longitud de la fibra. Por otro lado, la media armónica y geométrica son menos afectadas por los valores extremos o muy altos; sin embargo, la calidad del estimador no es buena porque su eficiencia disminuye por los cambios en las características de los datos (Franquet-i-Bernis & Josep M, 2019).

Así mismo, la trimedia es un método que consiste en calcular un promedio con pesos del primer, segundo y tercer cuartil, su valor no se ve afectado por los datos atípicos en gran medida y como se puede ver en la Tabla 3.1.1.3 la variación con los métodos más robustos disminuye. Por otro lado, en la Tabla 3.1.1.3 también se puede observar métodos fuertemente robustos, como el estimador-M de Huber, estimador bioponderado de Tukey, estimador M-redescendente de Hampel y estimador en onda de Andrew.

Estos se diferencian por el tipo de ponderación aplicada sobre los datos. Cada método tiene ponderaciones diferentes pero el método que mejores resultados ofrece es el que tenga un valor de “corte” en la distribución sobre aquellos valores más altos. Por ejemplo, el método de Huber es utilizado cuando la distribución se puede adaptar como gaussiana, mientras que el bioponderado de Tukey se utiliza cuando existen valores extremos con una gran cola en la distribución (Mair & Wilcox, 2020).

Por lo tanto, el valor de longitud promedio elegido fue de 728,8 μm obtenido con el método de Bioponderado de Tukey debido a su gran robustez y confiabilidad. Este método ha sido utilizado ya que el conjunto de datos tiene una asimetría positiva con una amplia cola de distribución (Lee & Lee, 2018), es decir cumple con las especificaciones de uso del método.

Análisis de los datos obtenidos del ensayo a tracción

Para la caracterización a tracción del material compuesto se han determinado las propiedades mecánicas de diferentes probetas. En la Tabla 3.1.2.1 se presentan los valores de resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y porcentaje de elongación antes del intemperismo.

Tabla 3.1.2.1. Resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y porcentaje de elongación antes del intemperismo.

Temperatura [°C]	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de Elasticidad [MPa]	Porcentaje de Elongación [%]
80	2,92 \pm 0,29	178,29 \pm 12,43	11,28 \pm 0,38
100	2,65 \pm 0,30	104,70 \pm 8,62	13,44 \pm 1,36
120	2,52 \pm 0,13	99,18 \pm 6,41	13,94 \pm 1,08
140	2,20 \pm 0,32	41,01 \pm 9,84	16,86 \pm 1,02
160	1,86 \pm 0,23	19,76 \pm 4,43	19,97 \pm 1,9

Según *Ghazilan et al* la fibra de palma aceitera tiene un comportamiento hidrófilo que causa una adhesión ineficiente de la fibra con la matriz polimérica, lo cual conducirá a una transferencia deficiente de tensión (Ghazilan et al., 2017). Por lo tanto, en el ensayo a tracción se han obtenido valores de resistencia a la tracción y módulo de elasticidad relativamente bajos como se puede observar en la Tabla 3.1.2.1. Sin embargo, para un correcto análisis, se han tomado valores de otras investigaciones de materiales compuestos para realizar una comparación. En la Tabla 3.1.2.2 se presentan los valores de resistencia a tracción y el módulo de elasticidad de otros materiales compuestos.

Tabla 3.1.2.2. Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad de materiales compuestos investigados.

Materiales Compuestos	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [MPa]	Referencia
Ácido poli láctico reforzado con fibra basáltica	59,50	4600	(Jenish et al., 2020)
Poliéster reforzado con fibra de sisal	126,20	2480	(Jenish et al., 2020)
Poliéster reforzado con fibra de bambú	65,50	1900	(Jenish et al., 2020)
Epoxi con fibra de platano	16,40	650	(Jenish et al., 2020)

Con referencia a la resistencia a la tracción, en la Tabla 3.1.2.2 se observan valores que llegan hasta 126,20 MPa. Sin embargo, como se puede observar en la tabla 3.1.2.1, el valor obtenido de resistencia a la tracción del material compuesto a 80°C es de 2,92 MPa. De igual manera ocurre con el módulo de elasticidad que en investigaciones similares alcanza valores de 4600 MPa mientras que el obtenido a 80°C fue de 178,29 MPa. Los valores de resistencia y módulo en comparación a la bibliografía son bajos y se debe a diversos factores.

Por ejemplo, un factor importante que afectó las propiedades mecánicas del material es la longitud de la fibra, ya que esta tiene un gran impacto en el módulo de Young, según *Obada et al* mientras mayor sea la longitud de la fibra, el módulo de elasticidad aumenta y proporciona una mayor rigidez al material compuesto. En el caso del composite elaborado con resina acrílica termoplástica y fibra del raquis de palma, el refuerzo no ha sido

tamizado, de manera que las fibras utilizadas en el material compuesto tienen diferentes longitudes (Obada et al., 2020).

Adicionalmente, Según *Supian y colaboradores* el diámetro de la fibra es un factor que altera el módulo de elasticidad del material (Supian et al., 2021) y según *Mahdi et al* las fibras naturales con menor diámetro proporcionan mejores propiedades mecánicas a los materiales compuestos (Mahdi et al., 2021). En este sentido, la fibra de palma generalmente tiene un grosor de 3,66 mm; sin embargo, se desconoce el valor real del grosor de la fibra utilizada, por lo cual no es posible evaluar la influencia del diámetro en las propiedades mecánicas de la fibra.

De igual manera, otra razón por la cual el módulo de Young y la resistencia a la tracción disminuyeron es porque no se realizó una limpieza previa de la superficie de la fibra antes de ser incorporada a la matriz, ya que mediante la limpieza de la fibra se evitan depósitos amorfos que podrían generar grietas dentro del material (Oushabi et al., 2017). Por otro lado, la transferencia de carga entre la matriz y la fibra se realiza por medio de la interfase y debido a que los polímeros que no reaccionaron e impurezas se quedaron en la misma, las propiedades mecánicas del material disminuyeron (Kalavagunta et al., 2017). Por otra parte, otro factor del cual dependen las propiedades mecánicas del composite es la composición de la fibra, mientras mayor contenido de celulosa posea el material de refuerzo, el composite tendrá diferentes propiedades mecánicas.

En otro aspecto, la matriz de resina acrílica también tuvo influencia en las propiedades mecánicas obtenidas, según *Ghazilan et al* la carga axial se ejerce primero sobre la matriz aglutinante y luego se trasfiere a la fibra, por lo tanto, la capacidad de resistencia del material compuesto contempla principalmente la matriz (Ghazilan et al., 2017). Sin embargo, los bajos valores de las propiedades mecánicas se comprueban con la investigación realizada por (Mamiński et al., 2016), en la cual determinó que un material compuesto reforzado con fibra de palma tiene un bajo módulo de ruptura que varía entre 7,50 y 5,40 MPa.

Por otro lado, en la Figura 3.1.2.1 se presenta el comportamiento de la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad del material a diferentes temperaturas de fabricación.

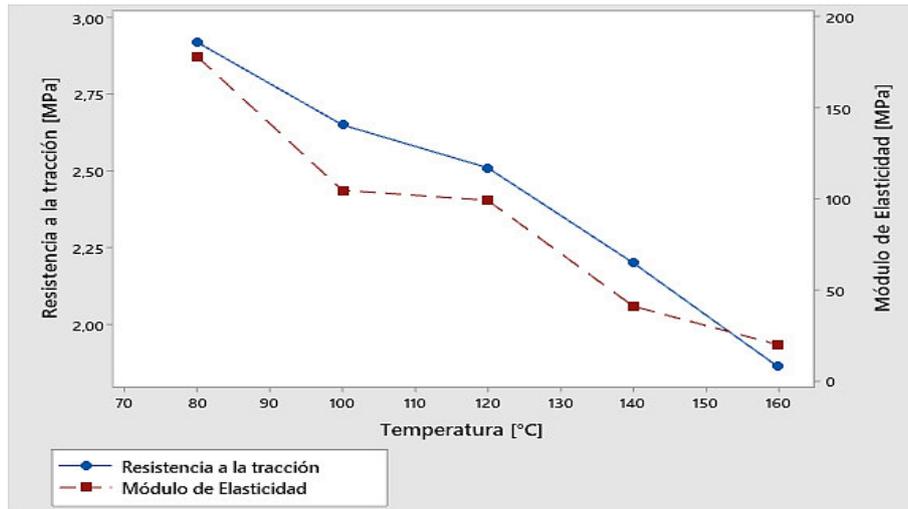


Figura 3.1.2.1 Comportamiento del composite a diferentes temperaturas antes del intemperismo.

Como se puede ver en la Figura 3.1.2.1 la resistencia y el módulo de elasticidad disminuye conforme incrementa la temperatura de fabricación del material, según *Kim et al* al aumentar la temperatura de fabricación la calidad de unión entre las fibras y la matriz es ineficiente por lo cual la resistencia a la tracción y el módulo disminuye (Kim et al., 2016).

Así mismo, según *Li y colaboradores* la óptima unión de matriz - refuerzo depende de la naturaleza de las materias primas y por lo tanto de la compatibilidad entre ellas (Li et al., 2017). En este contexto, la adhesión de la fibra con la matriz es de gran importancia, pero no es el único factor que determina las propiedades mecánicas del material compuesto huecos (Jenish et al., 2020), ya que también dependen de la extracción de las fibras, el contenido de fibras dentro del material, la humectabilidad de las fibras, la degradación y si la fibra se desprende fácilmente de la matriz al someterla a un proceso mecánico (Saba et al., 2019).

Con respecto al contenido de la fibra, según *Jain et al* cuando aumenta el contenido de fibra en la matriz la estabilidad térmica del material es mayor, en este aspecto, cuando el material posee mayor estabilidad térmica aumenta la resistencia a la tracción debido a que la termo estabilidad reduce el riesgo de grietas en la matriz (Jain et al., 2019).

Por otro lado, según *Gheith et al* los materiales compuestos fabricados a altas temperaturas a partir de 100°C sufren un incremento en la pérdida de peso lo cual se explica por la degradación de la fibra, cuando la fibra empieza a degradarse se desprende con mayor facilidad de la matriz por lo tanto disminuye la resistencia a la tracción (Gheith et al., 2019). Según *Al-Otaibi et al* la celulosa, la lignina y la hemicelulosa de la fibra se descomponen

lentamente y a un rango de temperatura de 200°C a 500°C (Al-Otaibi et al., 2020). Sin embargo, *Nordin y colaboradores* han demostrado que las fibras del raquis de palma africana se descomponen a partir de los 150°C de tal manera que la disminución de la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad se debe a la descomposición de la fibra (Nordin et al., 2016).

Además, según *Neher et al* el grosor de la fibra también es muy importante en cuanto al cambio de temperatura, debido a que la temperatura afecta en mayor proporción al lado más delgado de la fibra, por lo tanto, el lado más grueso de la fibra es térmicamente más estable, esto pudo haber generado un gradiente de temperatura en la fibra que provocó grietas y fallos en la matriz (Neher et al., 2016). Finalmente, otro factor que pudo disminuir las propiedades mecánicas del composite es la incompatibilidad de los materiales, debido a que las fibras de raquis de palma son polares y la matriz polimérica es no polar (Mohd Nurazzi et al., 2019).

En lo que se refiere al intemperismo, se obtuvieron valores que permitieron determinar resistencia, el módulo de elasticidad y el porcentaje de elongación presentados en la Tabla 3.1.2.3.

Tabla 3.1.2.3 Resistencia y Módulo de elasticidad después del intemperismo

Temperatura [°C]	Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de Elasticidad [MPa]	Porcentaje de Elongación [%]
80	2,04 ± 0,11	118,67 ± 9,0	11,13 ± 0,67
100	2,24 ± 0,57	185,32 ± 48,00	9,31 ± 1,02
120	3,19 ± 0,19	229,68 ± 17,19	9,27 ± 1,02
140	2,59 ± 0,23	150,12 ± 18,99	11,66 ± 1,01
160	3,21 ± 0,17	172,70 ± 11,33	13,95 ± 0,86

Como se puede observar en la Tabla 3.1.2.3 los valores de resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y porcentaje de elongación a 80°C disminuyeron con respecto a los valores obtenidos antes del intemperismo, a pesar de que el decrecimiento es muy pequeño, la reducción se debe a la naturaleza del polímero utilizado en la matriz. Según *Ratanawilai & Taneerat* uno de los factores que afecta las propiedades mecánicas con respecto al intemperismo es el tipo de polímero utilizado (Ratanawilai & Taneerat, 2018).

Sin embargo, hay otras razones que pueden explicar un descenso en el valor de las propiedades mecánicas, según *Bel Haj Frej, Léger, Perrin, Jenny, et al* la absorción de agua

aumenta linealmente hasta un límite en el en el cual la velocidad de difusión de absorción de humedad se vuelve más lenta, hasta que llega al límite de saturación (Bel Haj Frej, Léger, Perrin, lenny, et al., 2021).

Como consecuencia, la absorción de humedad provoca fallas por el incremento de volumen del material compuesto, de manera que la resistencia y el módulo de elasticidad disminuye. Las fallas pueden presentarse en forma de grietas que incrementan la porosidad en el composite y por tal motivo se incrementa la absorción de humedad (Hyvärinen et al., 2019). En este sentido, los abultamientos ocasionados por el incremento de humedad producen un mecanismo de falla por la difusión de las moléculas de agua (Mahdi et al., 2021).

Según *Das*, el hinchamiento también puede causarse en las fibras de palma porque son de naturaleza hidrofílica y como resultado los grupos hidroxilo en la estructura forman enlaces de hidrogeno con la molécula de agua al momento de absorber la humedad (Das, 2017). De manera similar, el contenido de fibra dentro de la matriz es un factor determinante en la absorción de humedad. Según *Medupin et al* mientras mayor sea el porcentaje de fibra dentro del material compuesto, el composite va a absorber mayor cantidad de humedad (Medupin et al., 2017).

Por otro lado, según *Mahdi et al* la absorción de humedad se debe a la morfología que posean las paredes celulares de la fibra. En el caso de la fibra de palma, la capa media gruesa está compuesta de celulosa, hemicelolusa y lignina, las cuales son las encargadas de determinar la resistencia de la fibra y desempeñan un papel muy importante dentro del material compuesto ya que le dan la capacidad de absorción de agua a la fibra, es decir, mientras mayor contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina posea la fibra, el composite tendrá una mayor capacidad de absorber la humedad (Mahdi et al., 2021).

Ahora bien, en la Figura 3.1.2.2 se puede observar la relación de la resistencia y el módulo de elasticidad con la temperatura de fabricación del material.

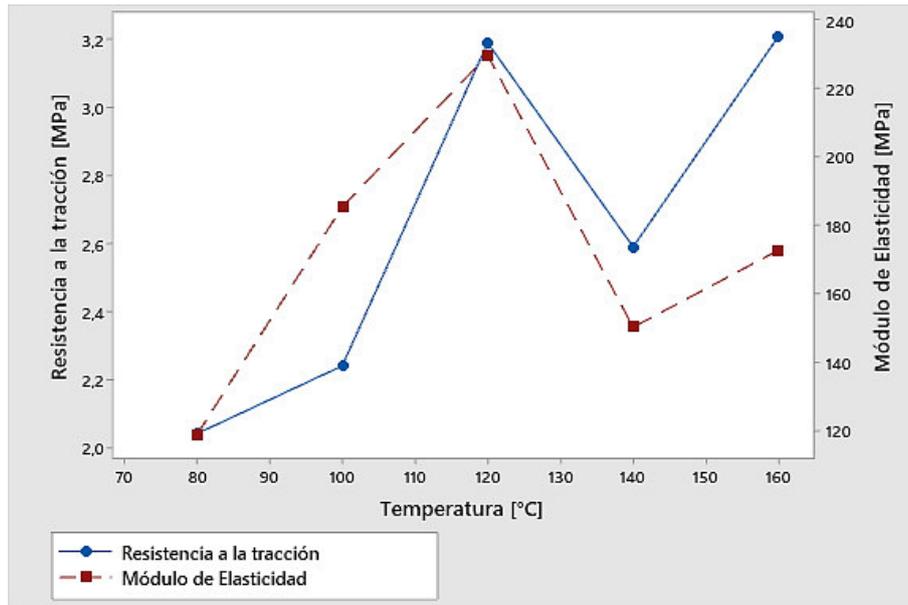


Figura 3.1.2.2 Comportamiento del composite a diferentes temperaturas después del intemperismo

En la Figura 3.1.2.2 se observa que la resistencia aumenta hasta un punto específico, luego disminuye y regresa a tomar un valor alto en la temperatura más alta y de igual manera ocurre con el módulo de elasticidad. Según *Bel Haj Frej et al* el intemperismo puede causar daños irreversibles en un material compuesto debido a la degradación físico química que ocurre en la cámara salina (Bel Haj Frej, Léger, Perrin, & Ienny, 2021). De igual manera, según *Mazur et al* someter un material compuesto a intemperismo generalmente es más susceptible al daño en temperaturas altas a partir de 120°C debido a que el material se vuelve más dúctil y absorbe al agua rápidamente (Mazur et al., 2019).

Sin embargo, el comportamiento que se puede observar en la Figura 3.1.2.2 se explica porque la absorción del agua favorece el incremento de volumen en la celulosa y según *Saba et al* cuando la celulosa aumenta su volumen proporciona mayor resistencia a la fibra (Saba et al., 2017).

Para finalizar con la caracterización del material compuesto, se realiza una breve comparación del comportamiento de las propiedades mecánicas del material compuesto con la variación de temperatura de manera gráfica. En la Figura 3.1.2.3 se presenta el comportamiento de la resistencia antes y después del intemperismo.

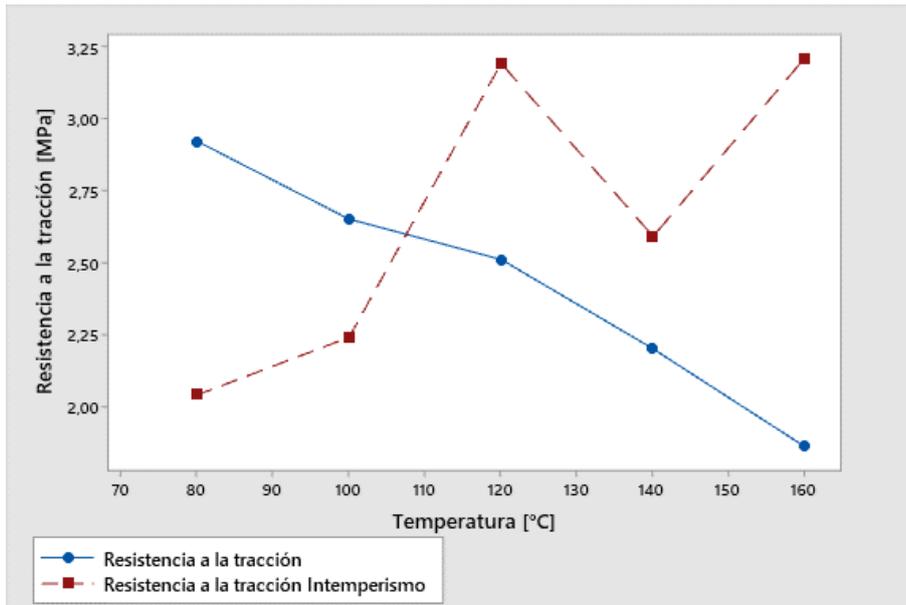


Figura 3.1.2.3. Comportamiento del composite antes y después del intemperismo

En la Figura 3.1.2.3 se observa que la resistencia antes del intemperismo disminuye conforme aumenta la temperatura de fabricación del material. Por otro lado, después del intemperismo, la resistencia aumenta conforme incrementa la temperatura de fabricación del material. De forma similar ocurre con el módulo de elasticidad que se puede ver en la Figura 3.1.2.4.

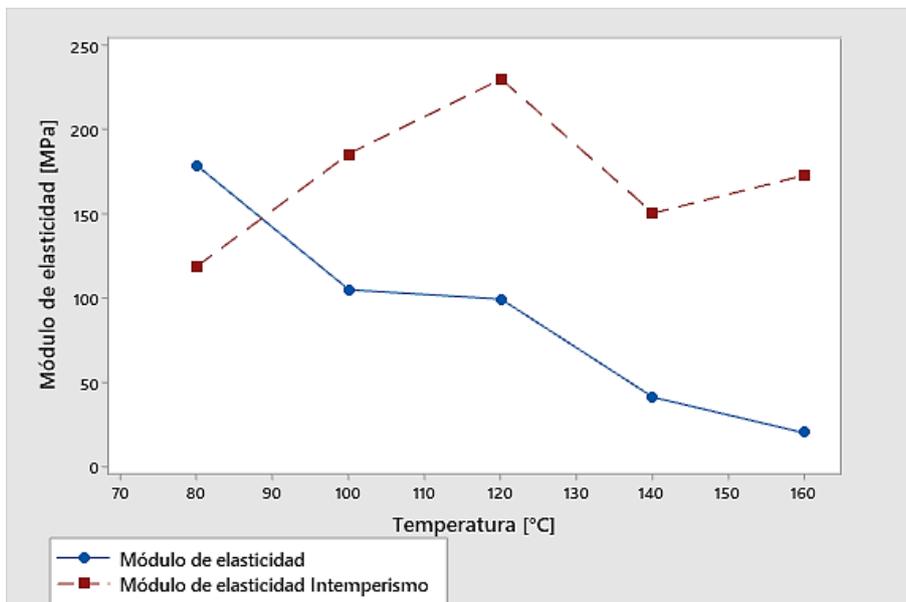


Figura 3.1.2.4. Comportamiento del composite antes y después del intemperismo

Este comportamiento se debe porque al momento de aumentar la temperatura de fabricación de los materiales, aumenta el volumen coordinado a los segmentos que posee la cadena móvil de la matriz, en este caso de la resina acrílica termoplástica. Antes del intemperismo con una matriz en condición normal – seca, la alta movilidad que se encuentra en las cadenas laterales produce una disminución de la resistencia y del módulo de elasticidad (Mazur et al., 2019).

Sin embargo, las muestras que fueron introducidas en la cámara salina absorbieron una cantidad de humedad que provocó el hinchamiento en las fibras. En este aspecto, el incremento del grosor de la fibra provocó el aumento de la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad (Christy et al., 2017). Una vez que llegó a la máxima absorción de humedad, la velocidad disminuyó, por lo tanto, se ve una reducción de valores después de 120°C, esto indica que las mejores propiedades mecánicas se han obtenido a 120°C después del intemperismo.

Además, según *Medupin et al* dentro de las 400 horas de someter un material compuesto en agua, aún puede volver a ser relativamente estable con el paso del tiempo, de manera que en la presente investigación al someter 330 horas a intemperismo al material compuesto tuvo la capacidad de volver a ser estable (Medupin et al., 2017); sin embargo, esto no ocurrió experimentalmente. En este contexto, según *Dixit et al* cuando el material compuesto absorbe la humedad, la resistencia disminuye, pero cuando se mantiene a una humedad constante la resistencia se incrementa debido a la formación de puentes de hidrogeno (Dixit et al., 2017).

Por otro lado, después del intemperismo, la resistencia a la tracción y el módulo incrementaron porque la lignina es más estable que la celulosa a altas temperaturas (George et al., 2016), es decir, la lignina a 160 °C aún proporciona buenas propiedades mecánicas a la fibra. Sobre la base del porcentaje elongación obtenido de los datos antes y después del intemperismo, se presenta la Figura 3.1.2.5.

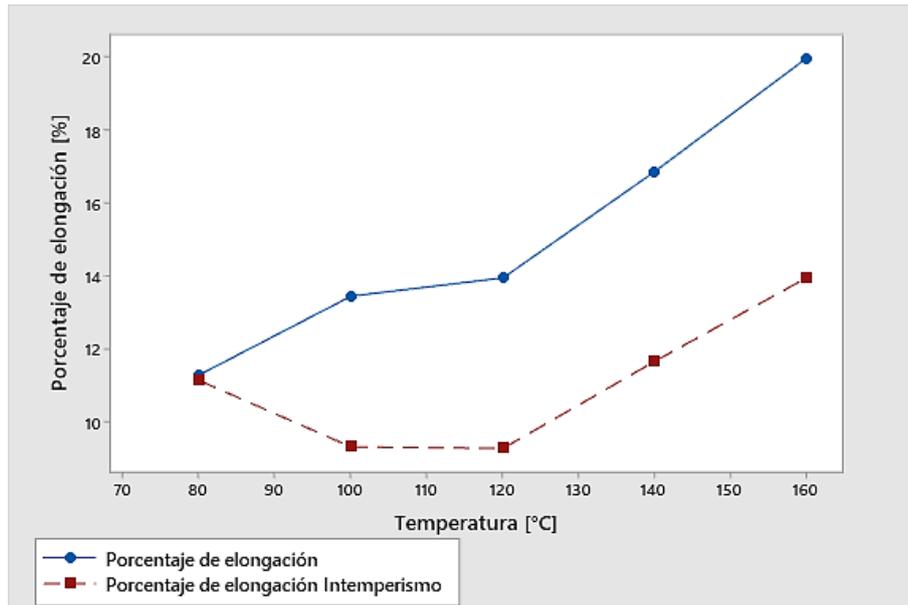


Figura 3.1.2.5. Comportamiento del composite a diferentes temperaturas antes y después del intemperismo

Como se puede observar en la Figura 3.1.2.5 el porcentaje de elongación se incrementa proporcionalmente con temperatura de fabricación del material antes y después del intemperismo, el principal factor por el cual la elongación a la rotura aumenta es por el bajo porcentaje de fibras o material de refuerzo que se coloca en la matriz. Es decir, mientras mayor cantidad de fibras se adicionen en la matriz el porcentaje de elongación disminuye debido a que las fibras dan una menor elasticidad al material (Zadeh et al., 2017).

Según Yee *et al* el aumento del porcentaje de elongación se debe a la naturaleza de la matriz utilizada (Yee et al., 2016), en este caso, la matriz es hidrofóbica y forma una capa de impedimento que prohíbe la formación de agregados, de tal manera que aumenta el grado de dispersión de la fibra dentro de la matriz (Yorseng et al., 2020).

3.2 Conclusiones

La longitud promedio se obtuvo con métodos de análisis robustos debido a que el conjunto de datos posee una distribución de datos asimétrica. La longitud promedio, obtenida con el mecanismo estadístico de bioponderado de turkey, fue de 728,8 μm .

Los valores de resistencia a la tracción y módulo de elasticidad fueron bajos debido a que la fibra tiene una gran variedad de longitudes, es decir, la matriz puede poseer fibras cortas o fibras largas.

Los bajos valores de las propiedades mecánicas se deben a la incompatibilidad de los materiales ya que la fibra del raquis de palma es polar y la matriz polimérica es no polar, lo cual reduce la adhesión de del material base y material de refuerzo.

La resistencia a tracción antes del intemperismo disminuyó conforme aumenta la temperatura de fabricación del debido a que a temperaturas mayores a 120°C la fibra se degrada y se desprende con mayor facilidad de la matriz.

La resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad disminuyeron después del intemperismo debido a que el material absorbió la humedad y se produjeron fallas en el composite.

La resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad después del intemperismo aumentaron conforme se incrementa la temperatura de fabricación del material debido a que la absorción de humedad favoreció al aumento de volumen de la celulosa.

A 120°C la resistencia antes del intemperismo fue de 2,52 MPa mientras que después del intemperismo fue de 3,19 MPa, esto demostró un incremento del 21% en la resistencia a la tracción.

A 120 °C el módulo de elasticidad antes del intemperismo fue de 99,18 MPa mientras que después del intemperismo fue de 229,78 MPa, es decir aumentó un 56,8%.

A 120°C el porcentaje de elongación antes del intemperismo fue de 13,94% mientras que después del intemperismo fue de 9,27%, esto demostró una disminución del 33% en el porcentaje de elongación.

El porcentaje de elongación antes y después del intemperismo aumentó conforme el incremento de temperatura de fabricación del material debido a la naturaleza de la matriz utilizada, en este caso, la matriz es hidrofóbica y forma una capa de impedimento que prohíbe la formación de agregados

Cuando las muestras fueron sometidas al intemperismo se pudo observar que la resistencia a la tracción y módulo de elasticidad incrementaron proporcionalmente con la temperatura de fabricación del material debido a que el hinchamiento de las fibras provocó un aumento de grosor de las mismas.

3.3 Recomendaciones

Analizar el material compuesto por medio del microscopio electrónico para determinar el cambio de morfología con el aumento de temperatura de fabricación del material.

Complementar la caracterización mecánica por medio de ensayos de impacto, ensayos de flexión y ensayos de rasgado.

Se sugiere elaborar el material compuesto con fibras previamente tamizadas con el fin de garantizar una longitud medio de las fibras y analizar las propiedades mecánicas nuevamente para determinar el incremento de la resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y porcentaje de elongación.

Complementar la caracterización del material compuesto mediante la técnica de infrarrojo transformado de Fourier y análisis termogravimétrico.

Determinar la cantidad de humedad absorbida por el composite después del intemperismo para determinar la influencia de la misma en las propiedades mecánicas con la variación de la temperatura de fabricación del material.

Se recomienda probar otras fibras conjuntamente con la fibra de palma y analizar la variación de las propiedades mecánicas en un material compuesto híbrido.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Adedeji, A. (2020). Thermochemical conversion of oil palm Fiber-LDPE hybrid waste into biochar. In *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* (Vol. 14, Issue 5, pp. 905–923). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/bbb.2123>
- [2] Afzaluddin, A., Jawaid, M., Salit, M. S., & Ishak, M. R. (2019). Physical and mechanical properties of sugar palm/glass fiber reinforced thermoplastic polyurethane hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 950–959. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.024>
- [3] Aje, O. F., Adie, A. J., & Markson, E. I. (2017). Development and Characterization of Nigerian Long Bamboo Fibre-Reinforced Polymer Composites. *American Journal of Materials Research*, 4(1), 1–6. <http://www.aascit.org/journal/ajmr>
- [4] Alarifi, I. M. (2021). Investigation into the morphological and mechanical properties of date palm fiber-reinforced epoxy structural composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 27(1), 77–88. <https://doi.org/10.1002/vnl.21785>
- [5] Al-Otaibi, M. S., Alothman, O. Y., Alrashed, M. M., Anis, A., Naveen, J., & Jawaid, M. (2020). Characterization of date palm fiber-reinforced different polypropylene matrices. *Polymers*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/polym12030597>
- [6] Alshammari, B. A., Saba, N., Alotaibi, M. D., Alotibi, M. F., Jawaid, M., & Alothman, O. Y. (2019). Evaluation of mechanical, physical, and morphological properties of epoxy composites reinforced with different date palm fillers. *Materials*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/ma12132145>
- [7] Apoveda, L. C., Bohórquez, O., González-Estrada, O. A., Pertuz, A., & Rueda, Y. (2019). Mechanical characterization of the rachis fiber obtained from the African palm *elaeis guineensis*. *Journal of Physics: Conference Series*, 1386(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1386/1/012051>
- [8] Bel Haj Frej, H., Léger, R., Perrin, D., & Lenny, P. (2021). Effect of aging temperature on a thermoset-like novel acrylic thermoplastic composite for marine vessels. *Journal of Composite Materials*. <https://doi.org/10.1177/0021998321996780>

- [9] Bel Haj Frej, H., Léger, R., Perrin, D., Ienny, P., Gérard, P., & Devaux, J. F. (2021). Recovery and reuse of carbon fibre and acrylic resin from thermoplastic composites used in marine application. *Resources, Conservation and Recycling*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105705>
- [10] Bessa, W., Trache, D., Derradji, M., & Tarchoun, A. F. (2021). Morphological, thermal and mechanical properties of benzoxazine resin reinforced with alkali treated alfa fibers. *Industrial Crops and Products*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113423>
- [11] Billat, V., Carbillet, T., Correa, M., & Pycke, J. R. (2019). Detecting the marathon asymmetry with a statistical signature. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 515, 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.09.159>
- [12] Cabrales, H., Arzola, N., & Araque, O. (2020). The effects of moisture content, fiber length and compaction time on African oil palm empty fruit bunches briquette quality parameters. *Heliyon*, 6(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05607>
- [13] Christy, A., Purohit, R., Rana, R. S., Singh, S. K., & Rana, S. (2017). Development and Analysis of Epoxy/nano SiO₂ Polymer Matrix Composite fabricated by Ultrasonic Vibration assisted Processing. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2748–2754. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.152>
- [14] Correa, J. B., Ariel, I., Menzie, N. S., & Brandon, T. H. (2017). Documenting the emergence of electronic nicotine delivery systems as a disruptive technology in nicotine and tobacco science. In *Addictive Behaviors* (Vol. 65, pp. 179–184). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.addbeh.2016.10.021>
- [15] Das, S. (2017). Mechanical and water swelling properties of waste paper reinforced unsaturated polyester composites. *Construction and Building Materials*, 138, 469–478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.041>
- [16] de Andrade Raponi, O., Righetti de Souza, B., Miranda Barbosa, L. C., & Ancelotti Junior, A. C. (2018). Thermal, rheological, and dielectric analyses of the polymerization reaction of a liquid thermoplastic resin for infusion manufacturing of composite materials. *Polymer Testing*, 71, 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.08.024>
- [17] Dinakaran, K., Ramesh, H., Dojo Joseph, A., Murugan, R., & Jothi, S. (2019). *Development and characterization of areca fiber reinforced polymer composite*. www.sciencedirect.com

- [18] Dixit, S., Goel, R., Dubey, A., & Bhalavi, T. (2017). *Natural Fibre Reinforced Polymer Composite Materials-A Review*.
- [19] Djoudi, T., Hecini, M., Scida, D., Djebbloun, Y., & Djemai, H. (2021). Physico-Mechanical Characterization of Composite Materials Based on Date Palm Tree Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 18(6), 789–802. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1658251>
- [20] Dunne, R., Desai, D., & Sadiku, R. (2017). Material characterization of blended sisal-kenaf composites with an ABS matrix. *Applied Acoustics*, 125, 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.03.022>
- [21] Espinach, F. X., Granda, L. A., Tarrés, Q., Duran, J., Fullana-i-Palmer, P., & Mutjé, P. (2017). Mechanical and micromechanical tensile strength of eucalyptus bleached fibers reinforced polyoxymethylene composites. *Composites Part B: Engineering*, 116, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.073>
- [22] Fabián, Z. (2021). Mean, mode or median? The score mean. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 50(10), 2360–2370. <https://doi.org/10.1080/03610926.2019.1666142>
- [23] Franquet-i-Bernis, & Josep M. (2019). *Conducto de agua con toma intermedia. Aplicación de la teoría de la optimización y generalización del problema*.
- [24] George, M., Mussone, P. G., Alemaskin, K., Chae, M., Wolodko, J., & Bressler, D. C. (2016). Enzymatically treated natural fibres as reinforcing agents for biocomposite material: mechanical, thermal, and moisture absorption characterization. *Journal of Materials Science*, 51(5), 2677–2686. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9582-z>
- [25] Ghazilan, A. L. A., Mokhtar, H., Shaik Dawood, M. S. I., Aminanda, Y., & Mohamed Ali, J. S. (2017). Tensile Mechanical Property of Oil Palm Empty Fruit Bunch Fiber Reinforced Epoxy Composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 184(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/184/1/012046>
- [26] Gheith, M. H., Aziz, M. A., Ghorri, W., Saba, N., Asim, M., Jawaid, M., & Alothman, O. Y. (2019). Flexural, thermal and dynamic mechanical properties of date palm fibres reinforced epoxy composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 853–860. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.013>
- [27] Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2020). A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications. In

Journal of Materials Science (Vol. 55, Issue 3, pp. 829–892). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>

- [28] Hanipah, S. H., Yu Xiang, L., Mohammed, M. A. P., & Samsu Baharuddin, A. (2017). Study of Non-linear Mechanical Behavior of Oil Palm Mesocarp Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 14(2), 153–165. <https://doi.org/10.1080/15440478.2015.1093575>
- [29] Hyvärinen, M., Ronkanen, M., & Kärki, T. (2019). The effect of the use of construction and demolition waste on the mechanical and moisture properties of a wood-plastic composite. *Composite Structures*, 210, 321–326. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.063>
- [30] Ighalo, J. O., Adeniyi, A. G., Eletta, O. A. A., & Arowoyele, L. T. (2020). Competitive adsorption of Pb(II), Cu(II), Fe(II) and Zn(II) from aqueous media using biochar from oil palm (*Elaeis guineensis*) fibers: a kinetic and equilibrium study. *Indian Chemical Engineer*, 1–11. <https://doi.org/10.1080/00194506.2020.1787870>
- [31] Ivey, M., Melenka, G. W., Carey, J. P., & Ayranci, C. (2017). Characterizing short-fiber-reinforced composites produced using additive manufacturing. *Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science*, 3(3), 81–91. <https://doi.org/10.1080/20550340.2017.1341125>
- [32] Jain, J., Jain, S., & Sinha, S. (2019). Characterization and thermal kinetic analysis of pineapple leaf fibers and their reinforcement in epoxy. *Journal of Elastomers and Plastics*, 51(3), 224–243. <https://doi.org/10.1177/0095244318783024>
- [33] Jenish, I., Veeramalai Chinnasamy, S. G., Basavarajappa, S., Indran, S., Divya, D., Liu, Y., Sanjay, M. R., & Siengchin, S. (2020). Tribo-Mechanical characterization of carbonized coconut shell micro particle reinforced with *Cissus quadrangularis* stem fiber/epoxy novel composite for structural application. *Journal of Natural Fibers*. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1838988>
- [34] Kalavagunta, V., Dhanajayan, G., Vamshi, V., & Satyanarana Gupta, M. (2017). Environmental study on gfrp composite laminates. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8(6), 480–493. <http://www.iaeme.com/IJMET/index.asp480http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=8&IType=6http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=8&IType=6>
- [35] Kar, J., Rout, A. K., & Kumar Sutar, A. (2018). Physical, Mechanical, and Erosion Characterization of Palm Leaf Stalk Fiber Reinforced Epoxy Composites Filled with

Palm Leaf Stem Stalk (PLSS) Powder. In *BioResources* (Vol. 13, Issue 4).
<https://doi.org/10.15376/biores.13.4.7212-7231>

- [36] Kazemi, M. E., Shanmugam, L., Chen, S., Yang, L., & Yang, J. (2020). Novel thermoplastic fiber metal laminates manufactured with an innovative acrylic resin at room temperature. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106043>
- [37] Khan, P. R., Hegazy, S. S., & Iqbal, M. (2020). Date palm rachis as a raw material for wood composite industry: anatomical characteristics. *Revista Brasileira de Botanica*, 43(3), 601–607. <https://doi.org/10.1007/s40415-020-00612-9>
- [38] Kim, E., Shin, Y. J., & Ahn, S. H. (2016). The effects of moisture and temperature on the mechanical properties of additive manufacturing components: Fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 22(6), 887–894. <https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2015-0095>
- [39] Kitchenham, B., Madeyski, L., Budgen, D., Keung, J., Brereton, P., Charters, S., Gibbs, S., & Pohthong, A. (2017). Robust Statistical Methods for Empirical Software Engineering. *Empirical Software Engineering*, 22(2), 579–630. <https://doi.org/10.1007/s10664-016-9437-5>
- [40] Kumar, R., & Anand, A. (2019). Fabrication and mechanical characterization of Indian ramie reinforced polymer composites. *Materials Research Express*, 6(5). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaff12>
- [41] Kwak, S. K., & Kim, J. H. (2017). Statistical data preparation: Management of missing values and outliers. In *Korean Journal of Anesthesiology* (Vol. 70, Issue 4, pp. 407–411). Korean Society of Anesthesiologists. <https://doi.org/10.4097/kjae.2017.70.4.407>
- [42] Lee, S., & Lee, D. K. (2018). What is the proper way to apply the multiple comparison test? *Korean Journal of Anesthesiology*, 71(5), 353–360. <https://doi.org/10.4097/kja.d.18.00242>
- [43] Li, G., Jiang, W., Fan, Z., Jiang, Z., Liu, X., & Liu, F. (2017). Effects of pouring temperature on microstructure, mechanical properties, and fracture behavior of Al/Mg bimetallic composites produced by lost foam casting process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(1–4), 1355–1368. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9810-y>

- [44] Mahdi, E., Ochoa, D. R. H., Vaziri, A., Dean, A., & Kucukvar, M. (2021). Khalasa date palm leaf fiber as a potential reinforcement for polymeric composite materials. *Composite Structures*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113501>
- [45] Mahesha, G. T., Satish, S. B., Kini, M. V., & Subrahmanya, B. K. (2017). Mechanical Characterization and Water Ageing Behavior Studies of Grewia Serrulata Bast Fiber Reinforced Thermoset Composites. *Journal of Natural Fibers*, 14(6), 788–800. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1279103>
- [46] Mair, P., & Wilcox, R. (2020). Robust statistical methods in R using the WRS2 package. *Behavior Research Methods*, 52(2), 464–488. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01246-w>
- [47] Mazur, K., Kuciel, S., & Salasinska, K. (2019). Mechanical, fire, and smoke behaviour of hybrid composites based on polyamide 6 with basalt/carbon fibres. *Journal of Composite Materials*, 53(28–30), 3979–3991. <https://doi.org/10.1177/0021998319853015>
- [48] Medupin, R. O., Abubakre, O. K., Abdulkareem, A. S., Muriana, R. A., Kariim, I., & Bada, S. O. (2017). Thermal and physico-mechanical stability of recycled high density polyethylene reinforced with oil palm fibres. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(6), 1623–1631. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.12.005>
- [49] Mishra, P., Pandey, C. M., Singh, U., Gupta, A., Sahu, C., & Keshri, A. (2019). Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(1), 67–72. https://doi.org/10.4103/aca.ACA_157_18
- [50] Mohd Nurazzi, N., Khalina, A., Sapuan, S. M., & Ilyas, R. A. (2019). Mechanical properties of sugar palm yarn/woven glass fiber reinforced unsaturated polyester composites: Effect of fiber loadings and alkaline treatment. *Polimery/Polymers*, 64(10), 665–675. <https://doi.org/10.14314/polimery.2019.10.3>
- [51] Mora Espinosa, W. J., Ramón Valencia, B. A., & Moreno Contreras, G. G. (2019). Physical-Mechanical Characterization of Moriche Natural Fibre (*Mauritia flexuosa*) and Composite with Bio-epoxy Resin. *Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 17(2), 60. <https://doi.org/10.24054/01204211.v2.n2.2019.3523>
- [52] Muralidhar, N., Kaliveeran, V., Arumugam, V., & Srinivasula Reddy, I. (2020). Dynamic mechanical characterization of epoxy composite reinforced with areca nut husk fiber.

Archive of Mechanical Engineering, 67(1), 57–72.

<https://doi.org/10.24425/ame.2020.131683>

- [53] Nasihatgozar, M., Daghigh, V., Lacy, T. E., Daghigh, H., Nikbin, K., & Simoneau, A. (2016). Mechanical characterization of novel latania natural fiber reinforced PP/EPDM composites. *Polymer Testing*, 56, 321–328.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.10.016>
- [54] Neher, B., Bhuiyan, M. M. R., Kabir, H., Gafur, M. A., Qadir, M. R., & Ahmed, F. (2016). Thermal properties of palm fiber and palm fiber-reinforced ABS composite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 124(3), 1281–1289.
<https://doi.org/10.1007/s10973-016-5341-x>
- [55] Ng, L. Y., Wong, T. J., Ng, C. Y., & Amelia, C. K. M. (2021). A review on cellulose nanocrystals production and characterization methods from *Elaeis guineensis* empty fruit bunches. In *Arabian Journal of Chemistry* (Vol. 14, Issue 9). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103339>
- [56] Nordin, N. A., Sulaiman, O., Hashim, R., & Mohamad Kassim, M. H. (2016). Characterization of different parts of oil palm fronds (*Elaeis guineensis*) and its properties. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 6(1), 74–76. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.6.1.643>
- [57] Obada, D. O., Kuburi, L. S., Dauda, M., Umaru, S., Dodoo-Arhin, D., Balogun, M. B., Iliyasu, I., & Iorpenda, M. J. (2020). Effect of variation in frequencies on the viscoelastic properties of coir and coconut husk powder reinforced polymer composites. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 32(2), 148–157.
<https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.10.001>
- [58] Obande, W., Mamalis, D., Ray, D., Yang, L., & Ó Brádaigh, C. M. (2019). Mechanical and thermomechanical characterisation of vacuum-infused thermoplastic- and thermoset-based composites. *Materials and Design*, 175.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107828>
- [59] Onoja, E., Chandren, S., Abdul Razak, F. I., Mahat, N. A., & Wahab, R. A. (2019). Oil Palm (*Elaeis guineensis*) Biomass in Malaysia: The Present and Future Prospects. In *Waste and Biomass Valorization* (Vol. 10, Issue 8, pp. 2099–2117). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0258-1>
- [60] Otto, G. P., Moisés, M. P., Carvalho, G., Rinaldi, A. W., Garcia, J. C., Radovanovic, E., & Fávaro, S. L. (2017). Mechanical properties of a polyurethane hybrid composite

with natural lignocellulosic fibers. *Composites Part B: Engineering*, 110, 459–465.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.035>

- [61] Oushabi, A., Sair, S., Oudrhiri Hassani, F., Abboud, Y., Tanane, O., & el Bouari, A. (2017). The effect of alkali treatment on mechanical, morphological and thermal properties of date palm fibers (DPFs): Study of the interface of DPF–Polyurethane composite. *South African Journal of Chemical Engineering*, 23, 116–123.
<https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.04.005>
- [62] Pini, T., Briatico-Vangosa, F., Frassine, R., & Rink, M. (2018). Matrix toughness transfer and fibre bridging laws in acrylic resin based CF composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 203, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.03.026>
- [63] Pini, T., Caimmi, F., Briatico-Vangosa, F., Frassine, R., & Rink, M. (2017). Fracture initiation and propagation in unidirectional CF composites based on thermoplastic acrylic resins. *Engineering Fracture Mechanics*, 184, 51–58.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.08.023>
- [64] Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., & Pruncu, C. I. (2019). Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6354–6374.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068>
- [65] Rajak, D. K., Wagh, P. H., Moustabchir, H., & Pruncu, C. I. (2021). Improving the tensile and flexural properties of reinforced epoxy composites by using cobalt filled and carbon/glass fiber. *Forces in Mechanics*, 4, 100029.
<https://doi.org/10.1016/j.finmec.2021.100029>
- [66] Rashid, B., Leman, Z., Jawaid, M., Ghazali, M. J., & Ishak, M. R. (2017). Dynamic mechanical analysis of treated and untreated sugar palm fibre-based phenolic composites. In *BioResources* (Vol. 12, Issue 2).
- [67] Ratanawilai, T., & Taneerat, K. (2018). Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: Effects on mechanical properties and resistance to natural weathering. *Construction and Building Materials*, 172, 349–357.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.266>
- [68] Rosadi, D., Setiawan, E. P., Templ, M., & Filzmoser, P. (2020). Robust covariance estimators for mean-variance portfolio optimization with transaction lots. *Operations Research Perspectives*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2020.100154>

- [69] Saba, N., Alothman, O. Y., Almutairi, Z., Jawaid, M., & Ghori, W. (2019). Date palm reinforced epoxy composites: Tensile, impact and morphological properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 3959–3969. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.004>
- [70] Saba, N., Safwan, A., Sanyang, M. L., Mohammad, F., Pervaiz, M., Jawaid, M., Alothman, O. Y., & Sain, M. (2017). Thermal and dynamic mechanical properties of cellulose nanofibers reinforced epoxy composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 102, 822–828. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.04.074>
- [71] Sanjay, M. R., Arpitha, G. R., Naik, L. L., Gopalakrishna, K., & Yogesha, B. (2016). Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview. *Natural Resources*, 07(03), 108–114. <https://doi.org/10.4236/nr.2016.73011>
- [72] Sanjay, M. R., Madhu, P., Jawaid, M., Sentharamaiah, P., Senthil, S., & Pradeep, S. (2018). Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 172, pp. 566–581). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.101>
- [73] Sathees Kumar, S., Muthalagu, R., & Nithin Chakravarthy, C. H. (2021). Effects of fiber loading on mechanical characterization of pineapple leaf and sisal fibers reinforced polyester composites for various applications. *Materials Today: Proceedings*, 44, 546–553. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.214>
- [74] Sekeri, S. H., Ibrahim, M. N. M., Umar, K., Yaqoob, A. A., Azmi, M. N., Hussin, M. H., Othman, M. B. H., & Malik, M. F. I. A. (2020). Preparation and characterization of nanosized lignin from oil palm (*Elaeis guineensis*) biomass as a novel emulsifying agent. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 3114–3124. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.181>
- [75] Singh, R., Singh, B., & Tarannum, H. (2019). Mechanical properties of jute fiber–reinforced UP/PU hybrid network composites. *Polymers and Polymer Composites*, 27(9), 546–556. <https://doi.org/10.1177/0967391119852882>
- [76] Strijker, D., Bosworth, G., & Bouter, G. (2020). Research methods in rural studies: Qualitative, quantitative and mixed methods. *Journal of Rural Studies*, 78, 262–270. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.06.007>
- [77] Supian, A. B. M., Jawaid, M., Rashid, B., Fouad, H., Saba, N., Dhakal, H. N., & Khiari, R. (2021). Mechanical and physical performance of date palm/bamboo fibre

- reinforced epoxy hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 1330–1341. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.115>
- [78] Tian, W., Qi, L., Su, C., Zhou, J., & Jing, Z. (2016). Numerical simulation on elastic properties of short-fiber-reinforced metal matrix composites: Effect of fiber orientation. *Composite Structures*, 152, 408–417. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.046>
- [79] Valle, V., Baquero, P., Rico, P., Kreiker, J., Raggiotti, B., & Cadena, F. (2021). Mechanical characteristics of composites based on oil palm empty fruit bunch, modified oca starch and polyvinyl alcohol. *Journal of Composite Materials*, 55(18), 2459–2468. <https://doi.org/10.1177/0021998321990735>
- [80] Wu, C. S., Liao, H. T., & Cai, Y. X. (2017). Characterisation, biodegradability and application of palm fibre-reinforced polyhydroxyalkanoate composites. *Polymer Degradation and Stability*, 140, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.04.016>
- [81] Yee, Y. Y., Chee Ching, Y., Rozali, S., Awanis Hashim, N., & Singh, R. (2016). PLA composite with OPEFB. In *BioResources* (Vol. 11, Issue 1).
- [82] Yerro, O., Radojevic, V., Radovic, I., Petrovic, M., Uskokovic, P. S., Stojanovic, D. B., & Aleksic, R. (2016). Thermoplastic acrylic resin with self-healing properties. *Polymer Engineering and Science*, 56(3), 251–257. <https://doi.org/10.1002/pen.24244>
- [83] Yorseng, K., Rangappa, S. M., Pulikkalparambil, H., Siengchin, S., & Parameswaranpillai, J. (2020). Accelerated weathering studies of kenaf/sisal fiber fabric reinforced fully biobased hybrid bioepoxy composites for semi-structural applications: Morphology, thermo-mechanical, water absorption behavior and surface hydrophobicity. *Construction and Building Materials*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117464>
- [84] Zadeh, K. M., Inuwa, I. M., Arjmandi, R., Hassan, A., Almaadeed, M., Mohamad, Z., & Khanam, P. N. (2017). Effects of date palm leaf fiber on the thermal and tensile properties of recycled ternary polyolefin blend composites. *Fibers and Polymers*, 18(7), 1330–1335. <https://doi.org/10.1007/s12221-017-1106-9>
- [85] Zainol Abidin, M. S., Herceg, T., Greenhalgh, E. S., Shaffer, M., & Bismarck, A. (2019). Enhanced fracture toughness of hierarchical carbon nanotube reinforced carbon fibre epoxy composites with engineered matrix microstructure. *Composites Science and Technology*, 170, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.11.017>

[86] Zhang, Z. (2016). Univariate description and bivariate statistical inference: The first step delving into data. *Annals of Translational Medicine*, 4(5).
<https://doi.org/10.21037/atm.2016.02.11>

1. ANEXOS

ANEXO I. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

Tabla 1. Procedimientos de caracterización, uso y método por el cual se realiza

Procedimiento de Caracterización	Uso	Método	Referencia
Morfología	Determina los cambios superficiales y estructurales	Microscopio electrónico de barrido	(Mahdi et al., 2021)
Hinchazón del espesor y absorción de agua	Estos factores pueden afectar a las propiedades mecánicas de la estructura	Método de remojo	(Afzaluddin et al., 2019)
Análisis termogravimétrico	Determina la pérdida de masa por el aumento de temperatura	Termobalanza	(Bessa et al., 2021) (Neher et al., 2016)
Análisis por FTIR	Determinar las formaciones cristalinas y los grupos funcionales que se encuentran en la muestra	Espectrofotómetro de infrarrojo	(Otto et al., 2017).

Dentro de los análisis del material, la morfología del material se ve influenciada de la fibra utilizada y generalmente se utiliza la microscopía electrónica de barrido para su análisis y muchas veces también se realiza un examen morfológico (Mahdi et al., 2021).

Por otro lado, la hinchazón del espesor del material o la absorción de agua del mismo es un análisis importante dentro de sus propiedades físicas debido a que estos factores pueden afectar a las propiedades mecánicas de la estructura y se determina con el método de remojo generalmente con base en la norma ASTM-D 570-98 y las ecuaciones pertinentes (Supian et al., 2021) de igual manera, la caracterización de la densidad es necesaria para evaluar físicamente el material y categorizarlo por su peso/volumen en la industria, se realiza fácilmente con un densímetro (Afzaluddin et al., 2019)

Otra caracterización se realiza mediante un análisis termogravimétrico utilizado para conocer la estabilidad térmica del material compuesto, se basa en una medición continua de la masa de la muestra en una termobalanza caracterizada por ser más sensible que una balanza normal (Medupin et al., 2017) la masa se mide conforme aumenta la temperatura del material dentro de una atmosfera inerte o con flujo de nitrógeno dinámico a una velocidad determinada (Bessa et al., 2021). En este aspecto, según *Neher y colaboradores* la pérdida de masa de la muestra puede deberse a la evaporación de la humedad o a la descomposición del material compuesto (Neher et al., 2016). Dentro del análisis termogravimétrico se puede determinar la termogravimetría derivada que estudia la derivada de la pérdida de masa en relación a la temperatura (Saba et al., 2017).

El FTIR-ATR, espectroscopía de infrarrojo es otro método importante que se utiliza en la caracterización de un material, para determinar las formaciones cristalinas y los grupos funcionales que se encuentran en la muestra y se presentan como espectros de reflexión de las bandas y señales de vibración (Otto et al., 2017).