

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA**

### **CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y POR FTIR DE BIO- COMPOSITES REFORZADOS CON RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS**

### **CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A TRACCIÓN Y POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA DE BIO-COMPOSITES ELABORADOS CON MATRIZ CONFORMADA POR PVAc/HARINA DE AMARANTO Y REFORZADOS CON RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS DE PALMA ACEITERA: RAQUIS Y CUESCO**

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

**JOSELYN MICHELLE BALLESTEROS GUERRA**

**josselyn.ballesteros@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: Ing. LAURO VLADIMIR VALLE ÁLVAREZ, M.Sc.**

**vladimir.valle@epn.edu.ec**

**DMQ, marzo 2024**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, JOSSELYN MICHELLE BALLESTEROS GUERRA 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.

---

**JOSSELYN MICHELLE BALLESTEROS GUERRA**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JOSSELYN MICHELLE BALLESTEROS GUERRA, bajo mi supervisión.

---

**LAURO VLADIMIR VALLE ÁLVAREZ**  
**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.

JOSSELYN MICHELLE BALLESTEROS GUERRA

LAURO VLADIMIR VALLE ÁLVAREZ

## **DEDICATORIA**

A José Luis, quien ha sido la luz en mi camino y me ha apoyado de manera incondicional durante esta etapa. Gracias por tu amor, paciencia, comprensión y sobre todo por convencerme cada día que lo puedo lograr y llegar muy lejos.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, quisiera agradecer a mi madre por ser mi guía durante estos años, estoy profundamente agradecida por todo lo que has hecho por mí. A mis hermanos, Sofía e Ismael, por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles; finalmente, a ese rayito de luz que ilumina nuestra familia, mi sobrino Julián. Los amo a todos y estaré eternamente agradecida por formar parte de mi vida y por ser parte de este logro.

A Ximena, José y Sebastián, gracias por su aliento y comprensión que han sido fundamentales en los momentos de desafío y celebración. Estoy agradecida por tenerlos en mi vida.

Al director del Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros -CIAP- y tutor en el desarrollo de este trabajo, el PhD. Vladimir Valle, por su acertada guía, apoyo, dedicación y paciencia.

A la Química Paola Yánez, por su apoyo en el desarrollo práctico de este trabajo.

Por último, agradecer a la Escuela Politécnica Nacional, que me ha exigido tanto, pero al mismo tiempo me ha permitido crecer profesionalmente y lo más importante me ha permitido crecer personalmente.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

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 .....	3
1.4 Marco teórico .....	3
2 METODOLOGÍA.....	8
2.1 Diseño de la investigación.....	8
2.2 Elaboración de bio-composites .....	9
2.3 Caracterización mecánica y espectroscopía infrarroja de bio-composites 11	
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	12
3.1 Resultados .....	12
3.2 Conclusiones.....	34
3.3 Recomendaciones.....	35
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	35
5 ANEXOS.....	40

## RESUMEN

La problemática ambiental actual generada por los grandes volúmenes de desechos provocados por el uso de plásticos derivados de petróleo, los gases de efecto invernadero y contaminación de fuentes de agua debido a lixiviados producto de un mal manejo de desechos agroindustriales lignocelulósicos plantea un reto en la investigación y desarrollo de nuevos materiales amigables con el medio ambiente. En este estudio se evaluó la influencia de la variación de los componentes presentes en el refuerzo sobre las propiedades mecánicas de tracción: módulo de elasticidad, resistencia a la tracción y elongación a la rotura, así como en las propiedades espectrofotométricas de biocomposites elaborados a partir de harina de amaranto, PVAc, reforzados con raquis y cuesco de palma aceitera. Para ello, se llevó a cabo el proceso de gelatinización de la harina de amaranto, se agregó PVAc y las proporciones cuesco/raquis (10:90) y (20:80) para la formulación 1 y 2. Se elaboró placas mediante moldeo por compresión a 120 °C. Para los ensayos de tracción se elaboró probetas tipo I, se utilizó una máquina universal y se aplicó carga con una velocidad de 5 *mm/min*. Las pruebas de tracción revelaron que la variación en las proporciones de refuerzo sí tiene una influencia significativa en el módulo de elasticidad, resistencia a la tracción y elongación a la rotura. Además, se realizó un análisis FTIR cuyos resultados reflejaron interacciones de enlace hidrógeno entre los componentes de la matriz y se identificó mayores concentraciones de lignina y celulosa en la formulación 2.

**PALABRAS CLAVE:** Materiales compuestos, raquis de palma africana, cuesco, polivinil acetato, caracterización mecánica, espectrofotometría, esfuerzo-deformación.

## ABSTRACT

The current environmental problems generated by the large volumes of solid wastes caused by the use of petroleum-derived plastics, greenhouse gases and contamination of water sources due to leachates resulting from poor management of lignocellulosic agro-industrial wastes raises a challenge in the research and development of new eco-friendly materials. This study evaluated the influence of the variation of the components present in the reinforcement on the tensile mechanical properties: modulus of elasticity, tensile strength, and breakage strain, as well as on the spectrophotometric properties of bio composites made from amaranth flour, PVAc, reinforced with rachis and palm kernels. For this purpose, the gelatinization process of amaranth flour was carried out, PVAc was added and the rachis/rachis ratios (10:90) and (20:80) for formulation 1 and 2. For the tensile tests, type I specimens were made, a universal machine was used, and a load was applied at a speed of 5 mm/min. The tensile tests revealed that the variation in reinforcement ratios does have a significant influence on the modulus of elasticity, tensile strength, and breakage strain. In addition, FTIR analysis was performed, the results of which reflected hydrogen bonding interactions between the matrix components and identified higher concentrations of lignin and cellulose in formulation 2.

**KEYWORDS:** Biocomposite, oil palm fiber, palm kernel oil, polyvinyl acetate, mechanical characterization, spectrophotometry, stress-strain,



# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El uso de plásticos derivados de fuentes fósiles ha crecido significativamente en las últimas décadas y con ellos, la preocupación relacionada con las cuestiones ambientales y de sostenibilidad. Pese a que estos son utilizados en una gran variedad de aplicaciones, presentan serios problemas al ecosistema debido a su lenta degradación, lo que resulta en la generación de grandes volúmenes de desechos (Menossi et al., 2021). Por otra parte, el sector agroindustrial es un importante productor de residuos lignocelulósicos. A pesar de la naturaleza orgánica de estos residuos, su disposición inadecuada los convierte en un foco de atención, puesto que provoca impactos significativos tras la liberación de gases de efecto invernadero o lixiviados que contaminan fuentes de agua (Kufel y Kuciel, 2020).

La situación anteriormente expuesta representa una problemática ambiental alarmante, por lo que se requiere un intenso esfuerzo para desarrollar materiales amigables con el ambiente. En la actualidad, se ha investigado ciertos polímeros biodegradables como matrices para materiales compuestos, tales como el ácido poliláctico (PLA), succinato de polibutileno (PBS) y polihidroxialcanoatos (PHA); sin embargo, su alto costo de procesamiento y baja resistencia a agentes ambientales, químicos y de tracción limita su uso masivo (Mohammed, 2021). En este sentido, plantear soluciones alternativas para la elaboración de materiales verdes a partir de materias primas naturales ha llamado la atención de los investigadores. En particular, el uso de lípidos, proteínas o polisacáridos obtenidos de fuentes vegetales es de especial interés ya que es posible obtener materiales ecológicos. Recientemente, los productos farináceos —como la harina de amaranto— han ganado interés debido a su alta disponibilidad, costo accesible, renovabilidad y no tóxico (Tapia et al., 2005). No obstante, las limitaciones en cuanto a propiedades mecánicas y de barrera se refiere, representan inconvenientes en los materiales obtenidos. Para superar dichas deficiencias, la mezcla de harinas con polímeros sintéticos biodegradables como el acetato de polivinilo (PVAc) adquiere relevancia, debido a ya que este polímero presenta un alto porcentaje de grupos -OH en su estructura lo que lo hace soluble en agua y compatible con el almidón presente en las harinas, formando una fase continua cuando se tiene una mezcla (Menossi et al., 2021).

En esta era de revolución de materiales, la incorporación de fibras vegetales como refuerzo se ha priorizado con el fin de establecer un desarrollo sostenible. Estas fibras suelen obtenerse principalmente de procesos industriales, lo que las vuelve atractivas no solo en términos económicos, sino también desde la perspectiva de responsabilidad ambiental. Al presente, algunos de los residuos que se utilizan como refuerzos son la cascarilla de trigo, cascarilla de arroz, cascarilla de centeno, cascarilla de vaina de cacao, fibra de bagazo de

caña y fibra de palma aceitera (Kufel & Kuciel, 2020). En este sentido, la industria ecuatoriana de palma africana genera cerca de 3,2 millones de toneladas anuales de residuos generados en la extracción de aceite, donde el raquis y cuesco son los residuos vegetales de mayor volumen de generación con 843 y 163 toneladas anuales, respectivamente (Camacho et al., 2022), (Fedepalma, 2023), (ESIN Consultora S.A, 2014). Por lo tanto, al tener grandes volúmenes de residuos vegetales, resulta relevante su aprovechamiento en el desarrollo de materiales tales como los composites.

Dentro del estudio de materiales compuestos, la caracterización de sus propiedades es un aspecto relevante debido a que permite determinar su comportamiento frente a las diferentes condiciones que se pueden presentar en servicio. Según el propósito, se puede someter el material a caracterizaciones mecánicas o espectrofotométricas para asegurarse de que el composite en cuestión pueda funcionar adecuadamente durante su vida útil. De manera particular, el comportamiento mecánico de tracción permite conocer el esfuerzo interno al que está sometido un material debido a la aplicación de dos cargas axiales que actúan en sentido opuesto relacionándolo con la deformación antes de presentar fallas mecánicas (Mohammad, 2018), (Kumar et al., 2023). Por otro lado, la espectroscopia FTIR proporciona información sobre los grupos funcionales característicos presentes en estos materiales. Estos parámetros en conjunto, brindan una visión integral para comprender la microestructura y el comportamiento mecánico frente a cargas de tracción mecánicas de un material compuesto (Țucureanu et al., 2016).

Por lo mencionado, el presente trabajo de integración curricular propone la caracterización mecánica a tracción y por espectrofotometría infrarroja de materiales compuestos elaborados a partir de matrices de harina de amaranto y polivinil acetato (PVAc) con refuerzos lignocelulósicos de palma africana (raquis/cuesco).

## **1.1 Objetivo general**

Caracterizar el comportamiento mecánico y espectrofotométrico de materiales compuestos elaborados con matriz de polisacárido/polivinil acetato (PVAc), y reforzados con residuos lignocelulósicos derivados de la palma africana.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Elaborar materiales compuestos a partir de harina de amaranto, PVAc, y residuos de palma aceitera (raquis y cuesco).

2. Determinar la influencia de la variación en la composición del refuerzo sobre el módulo de elasticidad, resistencia a la tracción y elongación a la rotura de los composites obtenidos.
3. Analizar las características espectrofotométricas de los materiales compuestos elaborados, por medio de espectroscopía de infrarrojo por transformadas de Fourier (FTIR).

### 1.3 Alcance

El alcance del Trabajo de Integración Curricular considera:

1. Recopilación de información bibliográfica sobre las tendencias centradas en el avance de materiales compuestos que utilizan matrices biodegradables y refuerzos lignocelulósicos.
2. Elaboración de composites a partir de polisacárido/polivinil acetato (PVAc), y residuos lignocelulósicos derivados de la palma africana según las formulaciones y proporciones especificadas en la Tabla 1.1.
3. Caracterización mecánica de tracción y espectroscopía infrarroja a nivel de laboratorio de los composites elaborados.
4. Análisis de influencia de la variación de las composiciones del refuerzo en las propiedades mecánicas de tracción y espectrofotométricas de los composites elaborados.

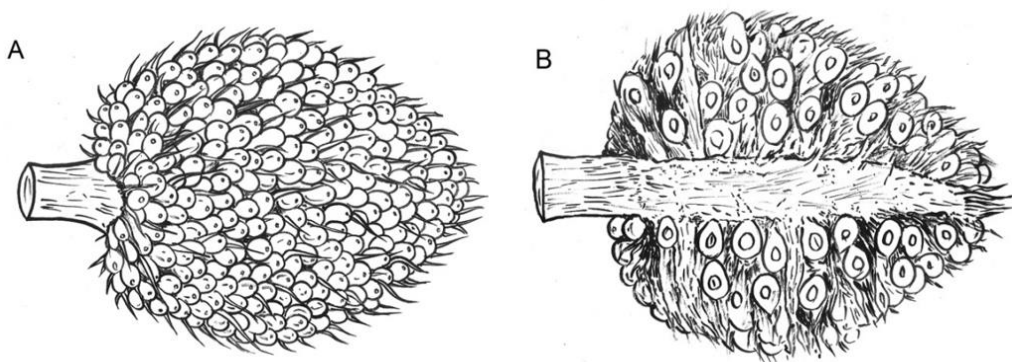
**Tabla 1.1:** Formulaciones a ensayar

Formulación	Matriz (35%)	Plastificante (25%)	Refuerzo (40%)
1	Harina de amaranto:PVA (20:80)	Glicerol	Fibra:cuesco (10:90)
2	Harina de amaranto:PVA (20:80)		Fibra:cuesco (20:80)

### 1.4 Marco teórico

La producción y el uso de compuestos biodegradables "verdes" se reconoce como una solución al problema de los residuos plásticos. Una de las técnicas para producir estos materiales verdes consiste en la incorporación de diversos tipos de fibras naturales a polímeros biodegradables, tales como el almidón, la quitina, el quitosano, la celulosa y las proteínas.(Chaiwong et al., 2019). Las fibras naturales han ganado mucha atención porque tienen ventajas de bajo costo, baja densidad, mejoran la resistencia al agua y poseen una

alta tenacidad con propiedades mecánicas aceptables (Saenghirunwattana et al., 2014). Entre las fibras que pueden ser aprovechadas se tiene aquellas que provienen de subproductos de procesos industriales —como la palma aceitera— que es uno de los cultivos oleaginosos comestibles de mayor rendimiento en el mundo. Una plantación de palma aceitera de una hectárea produce anualmente 5,5 toneladas de aceite y 55 toneladas de residuos vegetales, donde a partir de estos residuos se pueden extraer fibras lignocelulósicas del tronco, del mesocarpio del fruto o cáscara de semilla y del racimo vacío del fruto. En la Figura 1.1 se presenta un esquema del racimo de palma aceitera (A) y el corte de su sección transversal (B) (Shinoj et al., 2011).



**Figura 1.1:** Esquema del racimo de palma aceitera (A) y su sección transversal (B)

**Fuente:** (Shinoj et al., 2011)

Actualmente, los residuos vegetales de palma africana pueden ser utilizados en diferentes aplicaciones; por ejemplo, los residuos del racimo de frutos vacíos o raquis es una de las materias primas renovables más baratas para la producción de bioetanol (Chaiwong et al., 2019); también la cáscara de semilla o cuesco de palma aceitera puede ser empleada como biocombustible en calderos o como biomasa en hornos de sistemas de secado (Muhammad et al., 2021). No obstante, el principal interés de la utilización de fibras y cuesco de aceite de palma en la elaboración de materiales compuestos radica en su capacidad para formar un efecto sinérgico con ciertas matrices influyendo en las características finales del material compuesto como densidad, rigidez y resistencia (Chaiwong et al., 2019).

La elaboración de compuestos poliméricos con fibras naturales y alta resistencia va a estar influenciada de varios de factores relacionados principalmente con (i) la matriz polimérica, (ii) las propiedades de la fibra y (iii) las propiedades de la interfaz fibra-matriz. La resistencia y rigidez es una función directa de las propiedades de la fibra de refuerzo. Por otro lado, la matriz ayuda a mantener la posición de las fibras y permite que el material compuesto resista fuerzas y cargas aplicadas de manera más eficiente. (Nurazzi et al., 2021).

Shinoj et al. (2011) menciona que la selección de la matriz se basa en las propiedades finales deseadas de los materiales compuestos. Por tanto, se deberá considerar para una determinada combinación matriz-fibra, parámetros como el tipo de fibra, la orientación, el tamaño y el método de procesamiento. Específicamente, en la literatura centrada en este trabajo, la fibra de palma aceitera se ha probado en varias matrices, como el caucho natural (NR), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), fenol formaldehído (PF), poliuretano (PU), epoxi, poliéster, etc.

Dentro de las matrices que provienen de recursos renovables para la producción de materiales biodegradables, el alcohol polivinílico (PVA) y el almidón han presentado principal interés al ser polímeros biodegradables (Faruk et al., 2012). El PVA, un polímero soluble en agua facilita obtener una mezcla homogénea con el almidón, tiene baja permeabilidad y una gran capacidad de absorción de agua. Por lo tanto, estos dos polímeros en común los convierten en excelentes pares para la mezcla PVA/almidón (Chai et al., 2009). Pese a que se puede obtener el almidón independientemente, existen otro tipo de materiales como es el caso de los cereales donde no es necesario extraer el almidón para la producción de biocomposites, este es el caso del amaranto que es un pseudocereal donde sus semillas contienen una proporción significativa de almidón (62%) lo que convierte su harina en un material prometedor para la formación de biocomposites (Tapia-Blácido et al., 2005).

Por otro lado, al tener en el refuerzo una combinación de varios tipos de fibras naturales o una sola fibra en diferentes formas; por ejemplo, tejidas, no tejidas, de fibra larga, de fibra corta o en polvo, es conveniente el desarrollo de compuestos híbridos debido a que mejora propiedades mecánicas específicas, tienen el potencial de reemplazar los compuestos de fibras sintéticas en una variedad de aplicaciones, promueve la reciclabilidad y se tiene una reducción en los costos para aplicaciones de ingeniería (Nurazzi et al., 2021).

De forma general, la resistencia a la tracción de los materiales compuestos con refuerzos de polvo depende en gran medida del grado de unión interfacial entre el polvo y la matriz polimérica (Akinci, 2010). Específicamente, Nabinejad y sus colaboradores mencionan que el polvo de la cáscara de la semilla o cuesco de la palma aceitera posee una superficie rugosa y porosa, donde la rugosidad tiene un efecto positivo en el rendimiento mecánico de los materiales compuestos al restringir la movilidad de la cadena polimérica (Nabinejad et al., 2015).

Las propiedades mecánicas de tracción, como módulo de elasticidad, resistencia a la tracción y elongación a la rotura, juegan un papel crucial al evaluar el efecto de los

componentes, variación de composición y tipos de fibras que conforman la matriz/refuerzo en un material compuesto (Shinoj et al., 2011). Por un lado, la resistencia a la tracción es el valor del esfuerzo máximo en la curva de esfuerzo– deformación. El módulo de elasticidad es una medida de la rigidez del material y establece la relación entre el cambio de esfuerzo y la deformación correspondiente. Finalmente, la elongación a la rotura es la relación del alargamiento del material sometido a tensión, el cual proporciona una medida de la ductilidad. Un material dúctil es aquel que puede ser alargado o estirado significativamente antes de que se fracture, mientras que un material frágil es uno que falla bajo carga con poca o ninguna deformación plástica (Mott, 2009).

En un estudio realizado por AkmalHakim y sus colaboradores se evaluó la resistencia a la tracción y elongación a la rotura de películas biocompuestas de cáscaras de palma aceitera en diferentes proporciones (0%, 5%, 10%, 15% y 20%) y ácido poliláctico (PLA), donde ambas propiedades mecánicas disminuyeron con el aumento de las variaciones del refuerzo; sin embargo, el módulo de elasticidad aumento debido a la adición del relleno dentro de la matriz, lo que mejoró la rigidez del material. La disminución de la resistencia a la tracción se debe a la débil unión interfacial entre las cáscaras de palma aceitera que tienen una superficie hidrofílica lo cual se unen débilmente a la matriz de PLA de naturaleza hidrofóbica. Con respecto a la elongación a la rotura se debe al hecho de que la interacción relleno-matriz es débil; por lo tanto, la adición de cuesco a la matriz de PLA dificulta el alargamiento de rotura y se producen distorsiones significativas dentro de la matriz de PLA (AkmalHakim et al., 2016).

De la misma manera, Chun et al. (2013) incorporó polvo de cáscara de coco (CSP) a una matriz de PLA. Se investigó sus propiedades mecánicas en el biocompuesto PLA/CSP al variar diferentes proporciones de CSP (0, 15%, 30%, 45% y 60%). El aumento del contenido de CSP redujo la resistencia a la tracción y la elongación a la rotura, pero aumentó el módulo de elasticidad del material compuesto de PLA/CSP. El comportamiento sobre la resistencia a la tracción se debe a que para rellenos de forma irregular como el CSP, la capacidad de soportar la carga transferida desde la matriz es débil en comparación con la fibra de coco. Además, fue causada por una mala humectabilidad, dispersión y adhesión de la matriz de relleno entre el CSP hidrofílico y la matriz de PLA hidrofóbica (Chun et al., 2013), lo que concuerda con lo mencionado por AkmalHakim et al. en su estudio *“Chemical Modification of Palm Kernel Shell Filled Polylactic Acid Biocomposite Films”* en 2016.

Por el contrario, (Sahari & Maleque, 2016) investigó las propiedades mecánicas de los compuestos de cáscara de palma aceitera (OPS) con diferentes fracciones de volumen de

OPS (0%, 10%, 20% y 30%) y poliéster insaturado (UPE) como matriz. Los resultados presentaron que la resistencia a la tracción aumentaba con la carga de OPS, donde la fuerte unión entre el relleno hidrófilo y el polímero de matriz hidrófobo aumentó la eficiencia de transferencia de tensión y dio como resultado una mayor resistencia. Por lo tanto, el compuesto puede soportar una carga mayor antes de fallar en comparación con el poliéster no reforzado. Además, se observó el mismo comportamiento con el módulo de elasticidad donde el valor más alto de UPE/OPS se obtuvo con un 30% en volumen de OPS dando un valor de 8,50 GPa.

Por otro lado, Gopalakrishnan y sus colaboradores caracterizaron propiedades mecánicas de tracción en biocomposites a base de fibras de lino con diferentes composiciones (0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 % p/p), harina de trigo como refuerzo y otros compuestos como agua, glicerol como plastificantes, sorbitol, estearato de magnesio y sílice como lubricantes para la extrusión. En función de los resultados obtenidos se determinó que a medida que aumenta el contenido de fibra de lino, el valor del módulo de elasticidad aumenta de 120 MPa para 0 % (p/p) a 350 MPa para 10 % (p/p), luego permanece constante para contenido de fibra mayor al 20% (p/p). Por otro lado, el porcentaje de deformación disminuye del 17 % al 6 % para un 0 % (p/p) y 10 % (p/p) de fibras respectivamente, posteriormente se estabiliza para un mayor contenido de fibras. Finalmente, la resistencia a la tracción aumenta de 3 MPa a 8 MPa para un contenido de fibras del 10 % (p/p); posterior a ello, se vuelve constante para un contenido de fibras más elevado (Gopalakrishnan et al., 2008).

Dobircan y sus colaboradores observaron un comportamiento similar al encontrado por Gopalakrishnan y su equipo (2008) ya que observaron ya que en la evaluación de propiedades mecánicas de tracción del composite a base de matriz de harina de trigo reforzada con diferentes composiciones de fibra de algodón de desecho (0 %, 5 %, 7,5 %, 10 % y 15 % p/p) y glicerol como plastificante, se reportó que a medida que aumenta el contenido de fibra la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad aumentan, alcanzando un valor máximo con una cantidad de fibra del 10 % (p/p). Este incremento se debe a la buena dispersión de las fibras en la matriz, lo que dio lugar a una buena transferencia de tensiones entre las interfaces. Sin embargo, al aumentar la cantidad de fibra disminuye el porcentaje de alargamiento, desde 56 % para un contenido de fibra del 0 % p/p hasta 12 % para un contenido de fibra del 15 % p/p (Dobircan et al., 2009).

Otro caso relevante dentro de la investigación de biocomposites describe el trabajo realizado por Boontima et al. (2015), en el cual se evaluaron diferentes composiciones de matriz con el objetivo de lograr el máximo rendimiento mecánico; el material compuesto se

constituyó por un refuerzo a base de fibra de bagazo de caña de azúcar y una matriz de harina de soja (DSF)/PLA en diferentes proporciones; adicionalmente utilizaron glicerina como plastificante. Los resultados que obtuvieron de estos ensayos reflejan que con una composición de DSF/PLA de 50 % y 0 % respectivamente, se logra una resistencia al impacto de  $3,1 \text{ kJ/m}^2$  y una resistencia a la tracción de  $0,19 \text{ MPa}$ , mientras que con una proporción de DSF/PLA de 70% y 40% respectivamente lograron obtener un comportamiento mecánico caracterizado por una resistencia a la tracción  $5,8 \text{ MPa}$ , un módulo de elasticidad de  $490 \text{ MPa}$  y una resistencia al impacto de  $1,5 \text{ kJ/m}^2$  (Boontima et al., 2015).

Complementario a las propiedades mecánicas fundamentales de un material compuesto se debe tener en cuenta que la interacción entre compuestos es fundamental para crear un material resistente mecánica y químicamente (Theophanides, 2012). Por lo tanto, la FTIR permite la determinación de componentes o grupos de átomos que se absorben en el infrarrojo a frecuencias específicas, permitiendo la identificación de la estructura molecular (Țucureanu, Matei, & Marius, 2016).

Abdulraman et al. (2023) realizó un estudio donde aplicó el ensayo FTIR para determinar la interacción de los componentes en un material compuesto reforzado con 35 % (p/p) de fibras de palma de azúcar y almidón de trigo/PVA con 5 % y 25 % (p/p) respectivamente. Las curvas FTIR del almidón de trigo mostraron un pico en  $3280 \text{ cm}^{-1}$  el cual se refirió al estiramiento de los grupos O H; la adición de fibras de azúcar lo desplazó a  $3255 \text{ cm}^{-1}$ , mientras que la adición de PVA aumentó el número de onda lo que indica un mayor enlace de hidrógeno intermolecular entre el almidón y el PVA (Abdulrahman et al., 2023).

## **2 METODOLOGÍA**

### **2.1 Diseño de la investigación**

El diseño de la investigación proporciona un conjunto de reglas y procedimientos que estructuran y guían el proceso investigativo, con la finalidad de obtener estrategias estandarizadas para disminuir los sesgos del objeto de estudio. De esta forma, se determinan las directrices para el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos durante la investigación, asegurando la coherencia con los objetivos planteados (Hernández Sampieri et al., 2018).

Considerando el propósito de la investigación se seleccionó el método de estudio el cual depende de diversos factores, como la naturaleza del problema de investigación, los objetivos del estudio, la disponibilidad de recursos y el tipo de dato que se busca recopilar



(Hernández Sampieri et al., 2018). En la presente investigación, se utilizó un enfoque inductivo como método principal; debido a que se examinan exclusivamente casos específicos, cuyos resultados se utilizan para encontrar relaciones generales que los fundamenten. (Proudfoot, 2023).

Por otra parte, la elección apropiada del enfoque de investigación implica diversas formas de abordar el estudio de un fenómeno, donde se detallan ciertos aspectos del mismo (Borja, 2012). Esto se debe a que al tener en cuenta estas características, se puede identificar cuál es la mejor manera de acercarse al objeto de estudio (Milagros et al., 2020). En este contexto, en este proyecto de investigación, se ha optado por emplear el enfoque cuantitativo; ya que, mediante la experimentación y recolección de datos a través de mediciones, se utilizó la estadística como una herramienta para cuantificar los resultados. Por lo tanto, el trabajo que se ha desarrollado es de tipo experimental, ya que se realizó diferentes pruebas al variar las proporciones en el refuerzo del material compuesto, obteniendo así la influencia de la variación de este parámetro, el cual fue evaluado mediante ensayos de tracción donde se obtuvo datos respecto al módulo de elasticidad, resistencia a la tracción y elongación a la rotura; además, mediante un análisis espectrofotométrico se obtuvo información sobre los grupos funcionales característicos que se absorben en el infrarrojo a frecuencias específicas, permitiendo la identificación de la estructura molecular en estos materiales.

El análisis de datos en la caracterización mecánica se realizó mediante la aplicación de herramientas estadísticas basadas en el comportamiento de las muestras a través de la dispersión y tendencia central de las propiedades mecánicas anteriormente mencionadas, mientras que el análisis de FTIR se basó en la identificación de las bandas de absorbancia de cada formulación (Theophanides, 2012).

## **2.2 Elaboración de bio-composites**

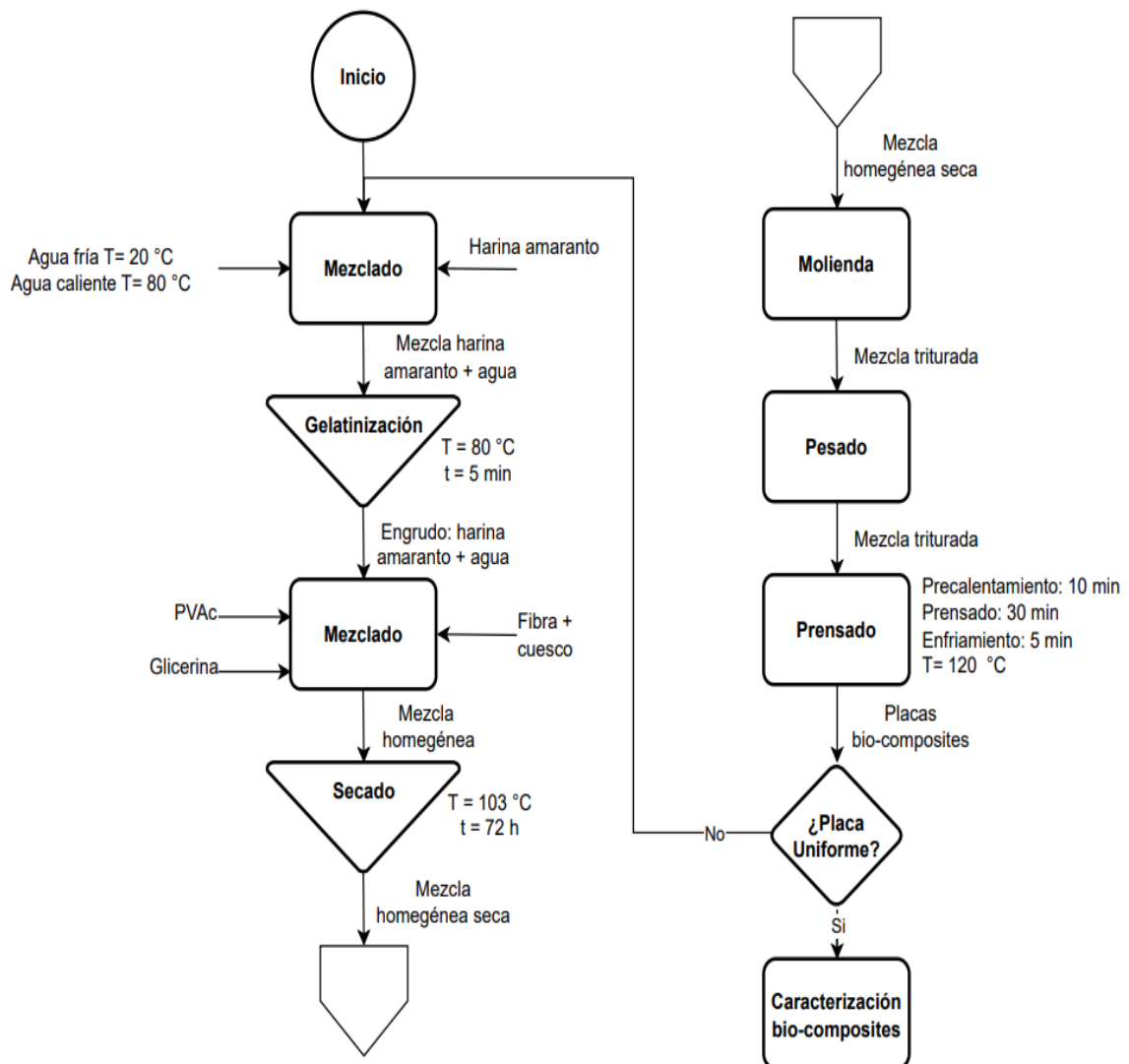
El procedimiento utilizado para la elaboración de placas de bio - composites reforzados con residuos lignocelulósicos se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 2.1.

Inicialmente, se mezcló harina de amaranto junto con agua fría y caliente a **20 °C** y **80 °C** respectivamente. Posteriormente, se llevó esta mezcla al proceso de gelatinización en una plancha de calentamiento AREC VELP SCIENTIFICA, modelo F20510011 a **80 °C** durante **5 min.**

Luego, se mezcló según la formulación a realizar las proporciones detalladas en la Tabla 1.1 las cuales estaban conformadas por engrudo: harina de amaranto + agua previamente

preparada, PVAc, glicerina, fibra y cuesco. La mezcla homogénea obtenida fue llevada a un proceso de secado en una estufa de convección natural MMM GROUP, modelo Ecocell durante 72 horas a 103 °C. Transcurrido este tiempo, la mezcla homogénea seca fue triturada en un molino de cuchillas SHINI, modelo SG-23483 (Ningbo, China).

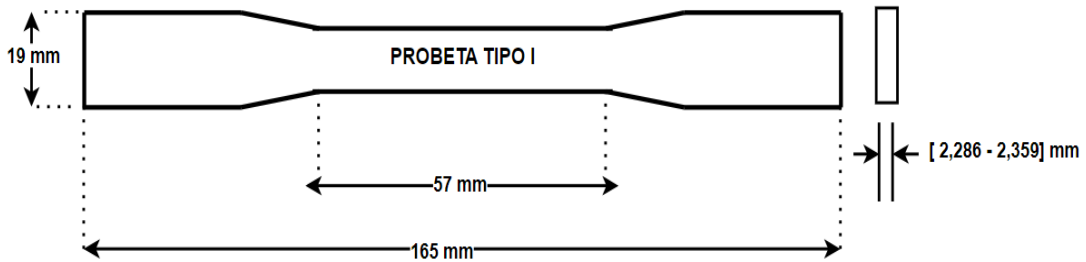
Para la obtención de las placas de bio-composites, la mezcla triturada se pesó y colocó en moldes metálicos de compresión; luego, se situó las placas en una prensa hidráulica LAB TECH, modelo LP-S-50 (Meuang Samunt Prakan, Tailandia) con las siguientes condiciones: temperatura de procesamiento de 120 °C, precalentamiento 10 minutos, prensado 30 minutos, enfriamiento 5 minutos y se aplicó 150 bar para comprimir las placas a muestrear. El procedimiento mencionado anteriormente se aplicó de manera idéntica tanto a la formulación 1 y 2 mostrada en la Tabla 1.1.



**Figura 2.1:** Diagrama de flujo para la elaboración de bio-composites

## 2.3 Caracterización mecánica y espectroscopía infrarroja de bio-composites

Para la caracterización mecánica de las formulaciones de los bio-composites especificados en la Tabla 1.1 se realizó pruebas mecánicas de tracción donde se obtuvo datos de esfuerzo y deformación para la posterior obtención del módulo de elasticidad, resistencia a la tracción y elongación a la rotura. Se realizó 28 probetas tipo I según la norma ASTM D638: método de prueba estándar para las propiedades de tracción de los plásticos en una troqueladora, cuyas dimensiones se indican en la Figura 2.2. Una vez obtenidas las probetas, se utilizó una máquina de ensayos universal INSTRON, modelo 3365 (Norwood, USA) compuesto por un par de mordazas de sujeción al cual se aplicó una velocidad de separación de 5 mm/min, una celda de carga de 5 kN y un indicador de desplazamiento.



**Figura 2.2:** Dimensiones de las probetas Tipo I según la norma ASTM D638

Por otro lado, para la caracterización espectroscopía de infrarrojo por transformadas de Fourier (FTIR) de los bio-composites se utilizó un espectrómetro JASCO, modelo FT/IR-C800 (Tokio, Japón), en un rango de  $4000$  a  $500\text{ cm}^{-1}$  utilizando una resolución de  $4\text{ cm}^{-1}$ . En la Figura 2.3 se presenta un esquema de la elaboración, caracterización mecánica y espectroscopía de los bio-composites.



**Figura 2.3:** Representación gráfica de la elaboración de bio-composites

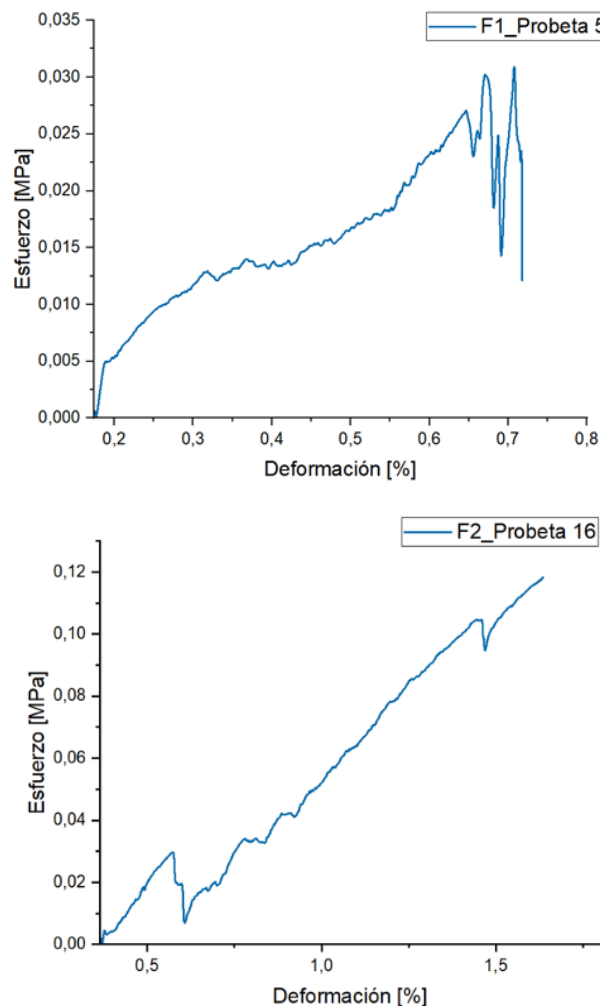
### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Resultados

##### 3.1.1 Caracterización mecánica

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales dependen de la compatibilidad que existe entre la fibra y la matriz, la homogeneidad del material, las características geométricas de las fibras, la orientación de las fibras dentro del material, donde este último factor tiene una gran influencia en propiedades mecánicas de tracción como el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción (William & Rethwisch, 2009).

Para cada una de las probetas ensayadas de las formulaciones 1 y 2 se realizó las curvas esfuerzo-deformación para llevar a cabo un análisis detallado del comportamiento de las mismas. Una vez graficadas las curvas esfuerzo-deformación de todas las probetas ensayadas se identificó ciertas curvas con comportamientos no usuales, por lo que se decidió llevar a cabo un proceso de selección en el cual se prestó especial atención a aspectos clave, tales como: forma de la curva esfuerzo-deformación, esfuerzo máximo alcanzado, porcentaje de deformación máximo antes de la rotura y cualquier comportamiento anómalo o cambio abrupto que pudiera indicar una respuesta no deseada del material. En el Figura 3.1 se presentan ejemplos de las curvas que fueron “descartadas” en ambas formulaciones. Además, las curvas restantes de las formulaciones 1 y 2 respectivamente se presentan en el ANEXO I para su referencia adicional.



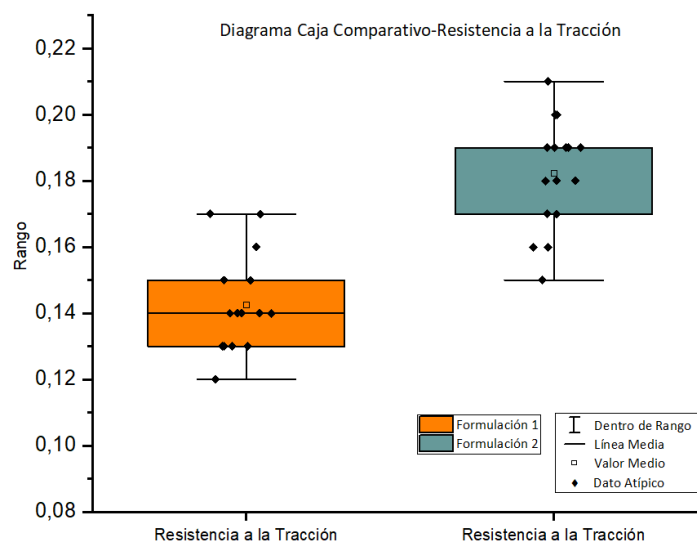
**Figura 3.1:** Curvas esfuerzo-deformación “descartadas” (Análisis Gráfico)

En la Figura 3.1 y en el ANEXO I se puede observar curvas con picos abruptos y caídas pronunciadas en la pendiente, siendo esto indicativo de comportamientos no deseados,

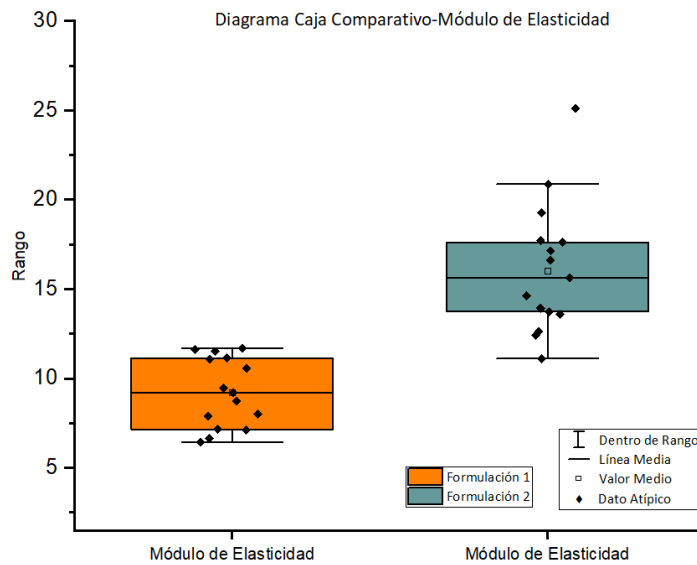
posiblemente influenciados por una mala sujeción en las mordazas en la máquina universal de ensayos. Otro parámetro a considerar es que pudieron haberse generado microfisuras en el material debido a que, durante algunos de los procesos —como el troquelado— en los cuales se manipula la probeta existe la posibilidad de generar pequeños cambios no perceptibles en la geometría de la sección transversal causando la aparición de concentradores de esfuerzos.

Una vez descartadas las gráficas con comportamientos anómalos, se procedió con la aplicación de un diagrama de caja, debido a que esta técnica que constituye una de las formas de representar visualmente datos cuantitativos e incluye la identificación de datos atípicos por lo que es una de las herramientas de análisis de datos más ampliamente usada. (Marmolejo & Tian, 2010).

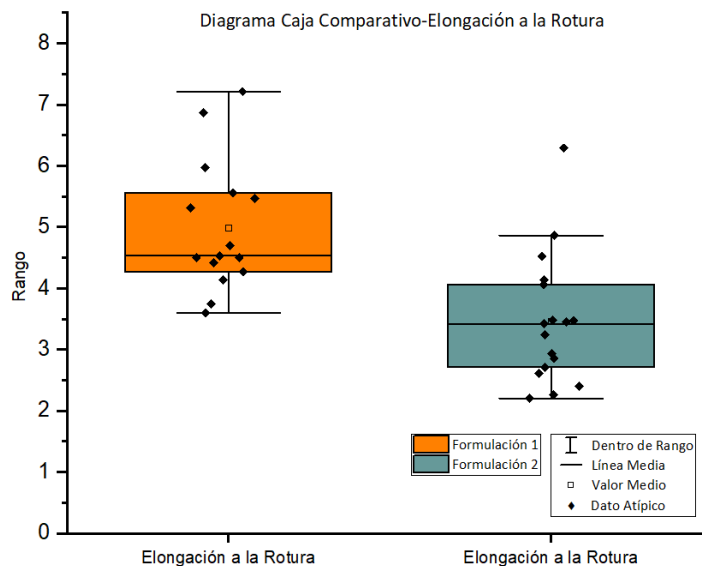
Se procedió a identificar posibles datos atípicos de cada una de las propiedades mecánicas de tracción para cada una de las formulaciones. Se utilizó la herramienta Microsoft® Excel® 2019 versión 2312, empleando el método de diagrama de caja para la detección y eliminación de valores atípicos. (James et al., 2019) señala que la presencia de valores atípicos puede tener un impacto significativo en los resultados de un análisis estadístico, especialmente cuando se trabaja con conjuntos de datos pequeños. No obstante, esto no implica que el análisis no sea necesario para conjuntos de datos más extensos; más bien, sugiere que, con un tamaño de muestra más grande, es posible mitigar los posibles efectos de los valores atípicos. Partiendo de esta premisa, los resultados de este proceso se presentan en las Figura 3.2, Figura 3.3 y Figura 3.4.



**Figura 3.2:** Diagrama de caja-Resistencia a la Tracción (Formulación 1 y 2)



**Figura 3.3:** Diagrama de caja-Módulo de Elasticidad (Formulación 1 y 2)

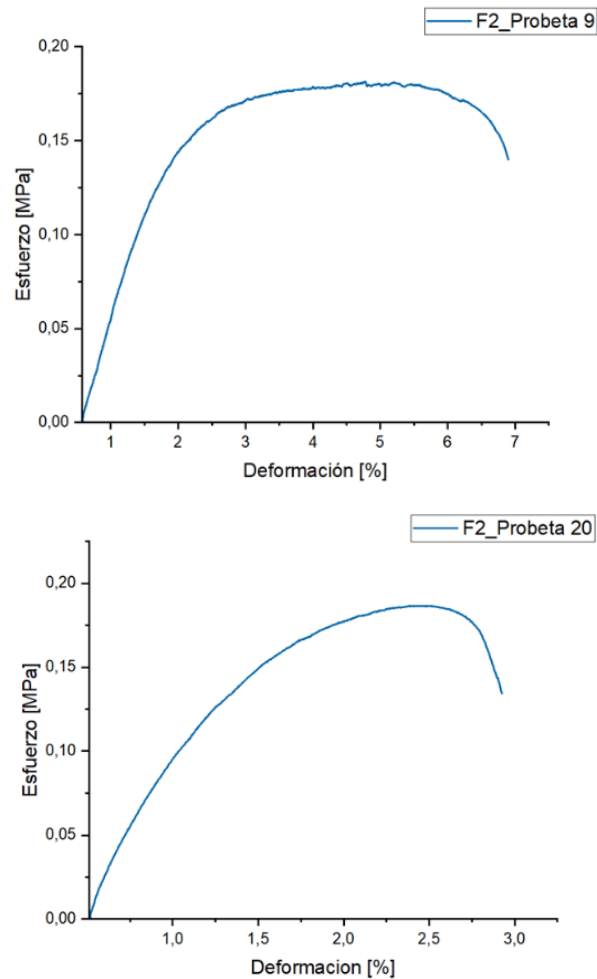


**Figura 3.4:** Diagrama de caja-Elongación a la Rotura (Formulación 1 y 2)

A partir de los diagramas de caja de cada una de las propiedades mecánicas, se evidencia que, en el caso de la formulación 1, no se detecta la presencia de datos atípicos, ya que todos los valores se encuentran dentro del rango establecido. Asimismo, se destaca que la mayoría de los datos en las tres propiedades mecánicas se concentran dentro del rango intercuartílico. Esto se traduce en que, para la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la elongación a la rotura, se tiene un 73,33 %, 66,67%, y 60 %, respectivamente, de los datos comprendidos dentro de la caja en cada gráfico.

En cuanto a la formulación 2, se identificó dos datos atípicos en las propiedades del módulo de elasticidad y elongación a la rotura los cuales se encuentran fuera del rango

intercuartílico. A pesar de que el análisis visual inicial cumplía con ciertas características de las curvas esfuerzo-deformación, el diagrama de caja permitió identificar desviaciones en los datos que no se identifican de manera cualitativa. Con base en este análisis, las curvas y datos obtenidos de estas probetas fueron descartados. Las curvas descartadas se presentan en la Figura 3.5.

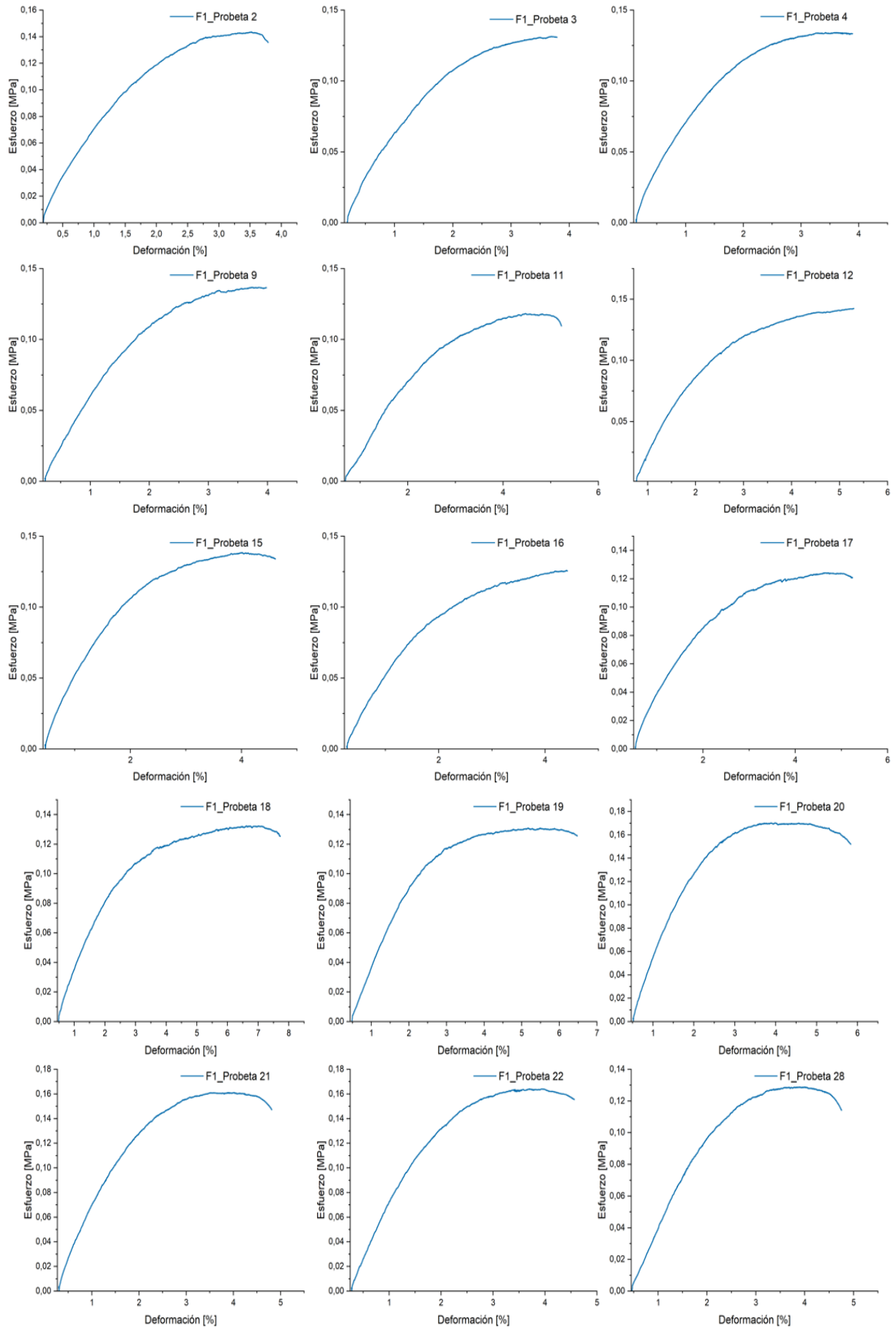


**Figura 3.5:** Curvas esfuerzo-deformación “descartadas” (Análisis Diagrama de Caja)

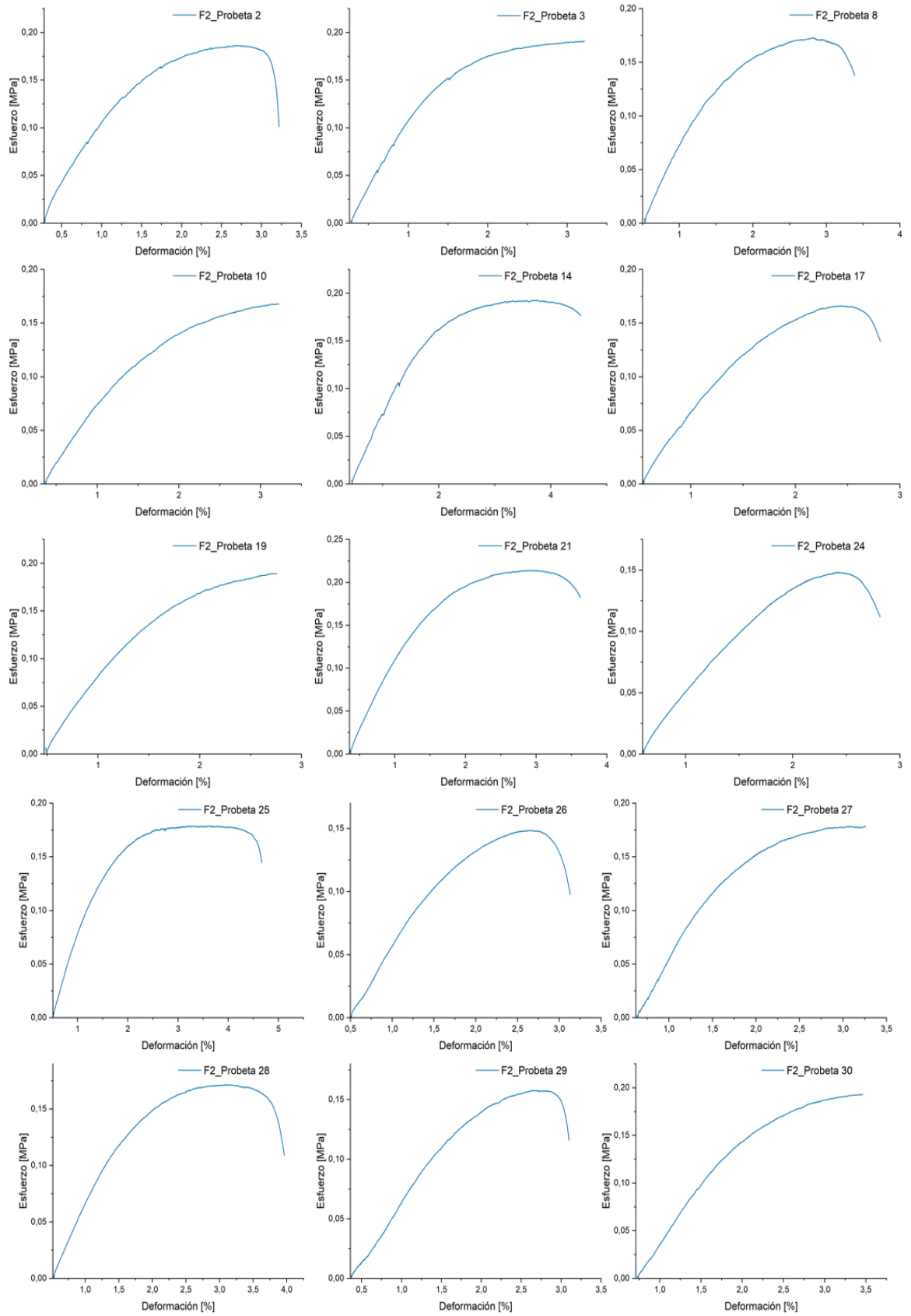
Adicionalmente, en el diagrama de caja de las propiedades mecánicas de la formulación 2 se observa que las tres propiedades mecánicas se concentran dentro del rango intercuartílico. En específico, la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la elongación a la rotura presentan un 64,70 %, 58,82 %, y 52,94 %, respectivamente, de los datos comprendidos dentro de la caja en cada gráfico.

Con base en el proceso de selección de curvas y el análisis de diagrama de caja, se presentan las curvas de las probetas seleccionadas para el análisis estadístico descriptivo en la Figura 3.6 y Figura 3.7, correspondientes a las formulaciones 1 y 2, respectivamente.





**Figura 3.6:** Formulación 1- Curvas esfuerzo-deformación “aceptadas”



**Figura 3.7:** Formulación 1- Curvas esfuerzo-deformación “aceptadas”

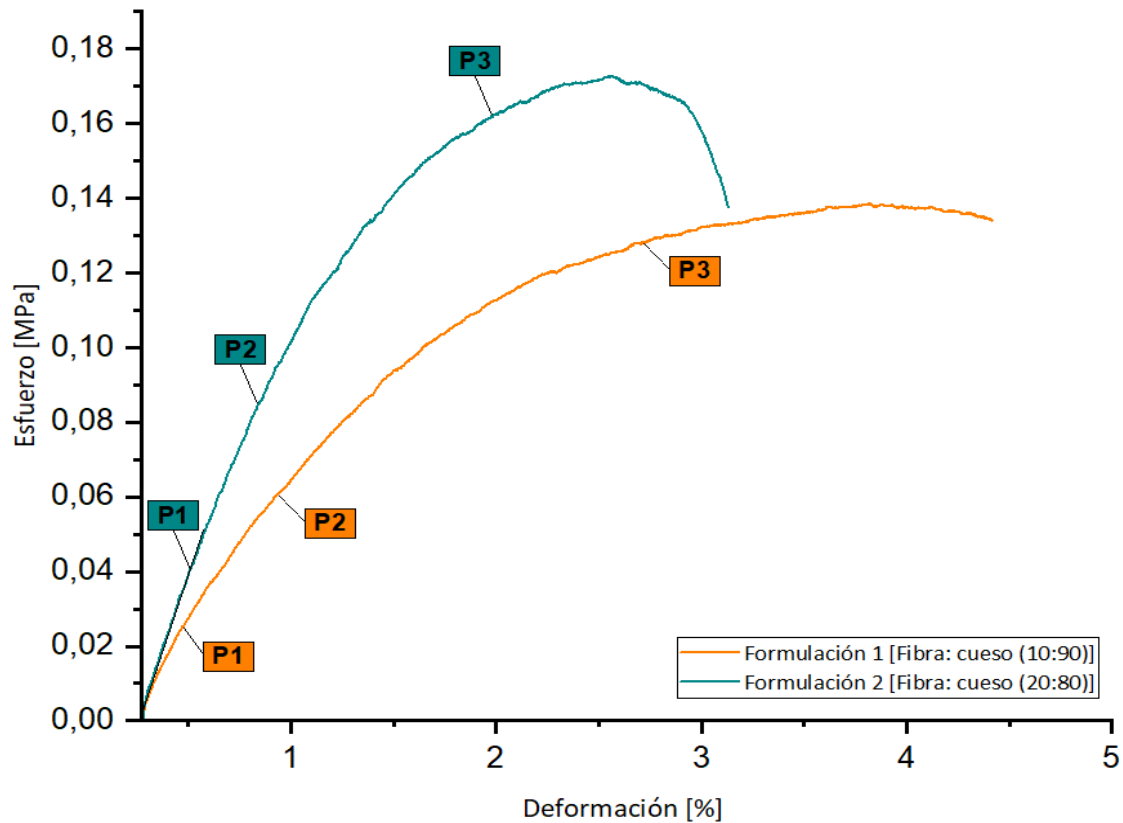
El análisis estadístico descriptivo aplicado a los datos de las formulaciones 1 y 2 se fundamentó en el uso de la media y la mediana como medidas de tendencia central de una distribución. Según lo mencionado por Mendenhall et al. (2015), aunque la mediana y la media son efectivas como medidas de centro, la mediana tiende a ser menos susceptible a valores extremos o datos atípicos. En situaciones donde una distribución es simétrica, la media y la mediana son iguales; no obstante, en casos de sesgo causado por valores extremos, deberá emplearse la mediana en lugar de la media como medida central. De este modo, cuando un conjunto de datos contiene valores extremadamente pequeños o grandes, la media muestral puede inclinarse en dirección a las mediciones extremas (Mendenhall et al., 2015).

Con base en lo expuesto anteriormente, la Tabla 3.1 presenta los resultados obtenidos de las medidas de tendencia central y desviación estándar. Además, el Anexo II contiene el análisis estadístico complementario realizado.

**Tabla 3.1.** Resultados análisis estadístico descriptivo de la caracterización mecánica.

<b>Propiedad Mecánica</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Fibra: cuesco (10:90) (Formulación 1)</b>	<b>Fibra: cuesco (20:80) (Formulación 2)</b>
<b>Módulo de Elasticidad [MPa]</b>	Medida Tendencia Central	9,21	15,62
	Desviación Estándar	1,94	2,72
<b>Resistencia a la Tracción [MPa]</b>	Medida Tendencia Central	0,14	0,18
	Desviación Estándar	0,01	0,02
<b>Elongación a la Rotura [%]</b>	Medida Tendencia Central	4,99	3,35
	Desviación Estándar	1,07	0,79

En función del proceso de selección de curvas realizado, el análisis gráfico cuantitativo mediante el diagrama de caja y aplicación del análisis estadístico descriptivo se seleccionó las curvas mostradas en la Figura 3.8 para la formulación 1 y 2.



**Figura 3.8:** Curvas esfuerzo-deformación formulación 1 y 2

En estas curvas, se puede apreciar que el material compuesto, tanto para la formulación 1 como para la formulación 2, exhibe un comportamiento que permite identificar claramente una zona elástica y una zona plástica. Además, se destaca de manera evidente la resistencia última y la deformación máxima en el punto de fractura lo cual indica un comportamiento mecánico coherente y consistente en el material.

Al analizar las curvas esfuerzo-deformación de ambas formulaciones, se observa un comportamiento inicial lineal a bajas deformaciones (Parte 1), seguido de una disminución en la pendiente de la curva asociada al inicio y propagación del mecanismo de falla, esta parte de la curva es conocida como la zona de transición (Parte 2). La siguiente parte de la curva presenta un cambio significativo en la pendiente que indica un comportamiento no lineal (Parte 3), esta tendencia se mantiene hasta el completo fallo del material. La parte 3 de las curvas, que conducen a la disminución de la pendiente, corresponden a la

deformación plástica de la matriz y están asociadas al probable inicio de microfisuras en la mismas.

Adicionalmente, se observó que al variar la proporción de fibra:cuesco de (10:90) a (20:80), la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la parte 1 aumenta; es decir, la zona elástica para la formulación 1 es menor que para la formulación 2. Por otra parte, se observó que la ductilidad del material disminuyó al variar la proporción de fibra:cuesco de (10:90) a (20:80), teniendo como resultado un menor porcentaje de deformación a la rotura en la formulación 2. Estos resultados concuerdan con lo presentado por Sreekala et al. (2001) en su estudio referente al comportamiento mecánico de composites híbridos reforzados con fibras de palma aceitera en el cual se describe un comportamiento mecánico del material caracterizado por tres zonas claramente definidas, donde las fibras y la matriz se comportan linealmente con deformaciones más bajas, seguido de una disminución de la pendiente para finalmente llegar a la ruptura del material. Además, se menciona que, para en este caso en específico la ductilidad es directamente proporcional a la cantidad de refuerzo de fibra de palma aceitera (Sreekala et al., 2001).

Al comparar los resultados obtenidos en la Tabla 3.1 con respecto al módulo de elasticidad, se obtuvo un aumento del 69,60 % al variar la proporción de fibra:cuesco de (10:90) a (20:80). Esto implica que la carga de refuerzo tiene una relación directa con la rigidez del material, lo que también se observó en el análisis de las curvas esfuerzo-deformación.

Además, se tiene un aumento de la resistencia a la tracción de 28,57 % al variar la proporción de fibra:cuesco de (10:90) a (20:80), lo que significa que existe una fuerte adhesión entre la fibra y la matriz de la formulación 2; por lo tanto, se requirió una mayor fuerza para superar la resistencia a la carga en la interfaz fibra-matriz, lo que se reflejó en una mayor resistencia a la tracción.

Los resultados obtenidos coinciden con la investigación realizada por Fazreen et al. (2018), donde se desarrolló un biocomposite a base de PVA/cuesco y glicerol como plastificante, donde se observó una disminución significativa en la resistencia a la tracción al aumentar el contenido de cuesco, este autor atribuye este resultado a una deficiente adhesión interfacial y a una distribución inadecuada del refuerzo dentro de la matriz (Fazreen et al., 2018). Así mismo, en una investigación llevada a cabo por AkmalHakim y colaboradores en 2016, quienes evaluaron la misma propiedad en un compuesto biodegradable a base de ácido poliláctico (PLA)/cuesco observaron una disminución en la resistencia a la tracción

a medida que aumentaba el contenido de cuesco cuyo comportamiento se atribuyó a la débil unión interfacial entre el cuesco y la matriz de PLA (AkmalHakim et al., 2016).

La conclusión mencionada AkmalHakim et al. (2018) referente a la débil unión interfacial entre el cuesco y la matriz de PLA, es causada por la naturaleza hidrofóbica de la matriz de PLA, que tiene una unión débil con la superficie hidrofílica del cuesco, debido a los grupos O-H. Esta diferencia de polaridades en la unión resultó en una falta de adherencia entre las fases, provocando fallas bajo la fuerza aplicada (AkmalHakim et al., 2016). Por lo tanto, debido al carácter hidrofílico de la fibra de raquis y cuesco, la adherencia interfacial con matrices hidrofóbicas, como en el caso del PVAc que predomina en relación a la harina de amaranto, es débil (Ghazilan et al., 2017).

Por otro lado, existe una disminución en el porcentaje de elongación a la rotura del 26,49% al variar la proporción de fibra:cuesco de (10:90) a (20:80), este comportamiento se da principalmente debido a la naturaleza inelástica de las partículas de cuesco en el refuerzo y la proporción que se tienen en cada formulación. Ezema Ike-Eze et al. (2019) menciona que una concentración adecuada de refuerzo aporta a una transferencia de carga eficiente entre la matriz y las partículas, teniendo como resultado una mejora en las propiedades elásticas (Ezema Ike-Eze et al., 2019).

Adicionalmente, en un estudio sobre materiales compuestos a base de residuos de palma aceitera, Yong et al. (2021) señala que la disminución en la elongación del composite se encuentra directamente asociado a la celulosa en dichos residuos vegetales, ya que, al poseer una estructura altamente cristalina, es la responsable de otorgar rigidez al composite, influyendo directamente en la deformación a la rotura (Yong et al., 2021). Por lo tanto, debido a que el raquis posee una mayor cantidad de celulosa en relación al cuesco y considerando las proporciones que se tiene en cada formulación, el contenido global de celulosa en la formulación 2 justifica el comportamiento descrito en la Figura 3.8 teniendo como resultado un aumento en la resistencia a la tracción y una disminución en la elongación a la rotura (Shinoj et al., 2011).

Finalmente, es importante mencionar que otros factores que influyen en las características mecánicas de tracción del biocomposite están relacionados con la disposición de raquis y cuesco de palma aceita en la matriz.

Con respecto a la disposición de las fibras en la matriz, se tuvo una distribución aleatoria tanto de raquis y cuesco, que incide directamente en las propiedades mecánicas de tracción, debido a que existió la posibilidad de que se formen aglomeraciones de fibras o cuesco provocando posibles distribuciones de esfuerzo no uniformes. Esto concuerda con

lo mencionado por Hao et al. (2020) quien estudia los efectos de la distribución, disposición y geometría de las fibras en un material compuesto, este autor hace énfasis en que las propiedades mecánicas de un biocomposite con fibras orientadas paralelas al eje de aplicación de carga describen un comportamiento mecánico a tracción más eficiente cuando las fibras están dispuestas paralelas al eje. Además, menciona que la relación entre la longitud y el diámetro de la fibra tiene una influencia directa sobre propiedades mecánicas como: resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión y al impacto independiente del ángulo de orientación (Hao et al., 2020).

Con la finalidad de determinar si existe una diferencia significativa entre los resultados obtenidos de la Tabla 3.1 sobre propiedades mecánicas de tracción para la formulación 1 y 2, se realizó un análisis de estadística inferencial aplicando la técnica de prueba de hipótesis mediante el cual se trata de probar que la cantidad de cuesco y fibra de palma africana aplicados en la matriz del composite o material compuesto afecta directamente en su comportamiento mecánico.

Debido a que el tamaño de las muestras es pequeño ( $n_1, n_2 < 30$ ) para ambas formulaciones, se aplicó la prueba t para inferencia estadísticas a partir de muestras pequeñas (Mendenhall et al., 2015). Para la realización de la prueba de hipótesis se plantea una hipótesis nula ( $H_0$ ) e hipótesis alternativa ( $H_a$ ):

1. **Hipótesis nula:** La variación de la cantidad de cuesco y fibra de palma africana aplicados en la matriz del composite no afectan a las propiedades mecánicas de tracción por lo que la diferencia en las medidas de tendencia central es producto del azar.

$$H_0: (\mu_1 - \mu_2) = 0$$

#### **Ecuación 3.1.** Hipótesis nula

2. **Hipótesis Alternativa:** La variación de la cantidad de cuesco y fibra de palma africana aplicados en la matriz del composite si afecta a las propiedades mecánicas de tracción por lo que existe una diferencia en las medidas de tendencia central.

$$H_a: (\mu_1 - \mu_2) \neq 0$$

#### **Ecuación 3.2.** Hipótesis alternativa

Una vez establecidas las hipótesis se obtuvo el estadístico de prueba cuya finalidad es establecer los lineamientos para aceptar o rechazar la hipótesis nula, para el caso de la

prueba t para dos muestras independientes con varianzas diferentes  $t$  se presentan a continuación:

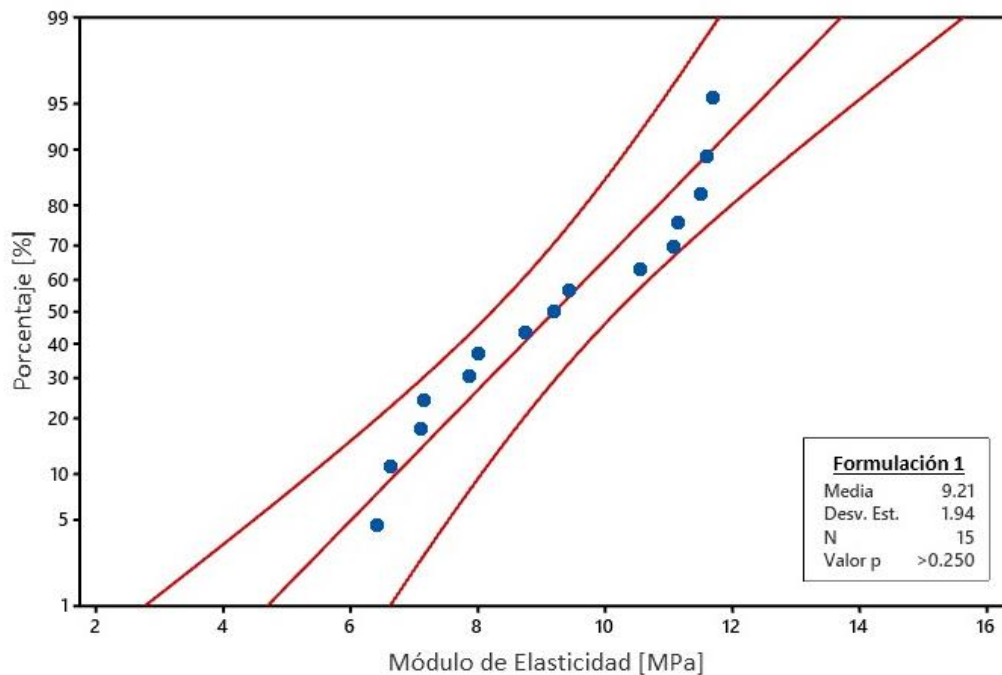
$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

**Ecuación 3.3.** Estadístico de prueba  $t$

Las condiciones para poder aplicar la prueba  $t$  a dos muestras son las siguientes:

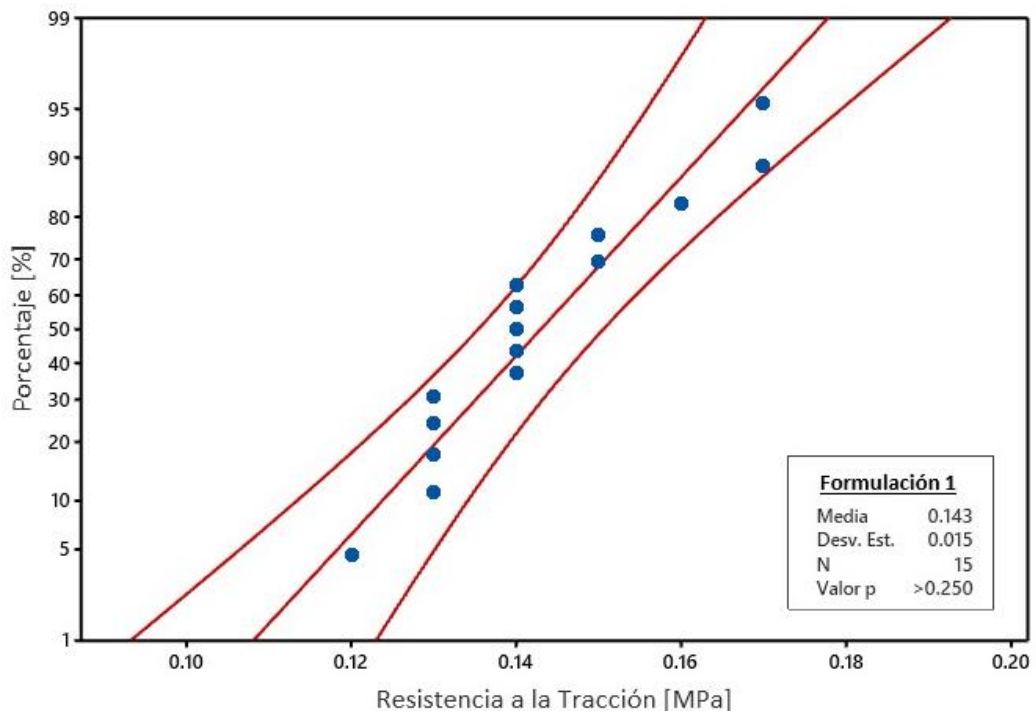
- Las muestras deben ser seleccionadas al azar
- Los datos de las muestras deben estar normalmente distribuidos.

La primera condición se cumplió debido a que no se ha aplicó un procedimiento de muestreo sistemático o algún criterio específico para la selección de probetas al momento de realizar la experimentación. Para verificar la segunda condición se ha realizado un análisis de los datos de las características mecánicas a través de gráficas de probabilidad con una confiabilidad del 95 %, es decir que se consideró una significancia del 5 % ( $\alpha = 0.05$ ), en este análisis se debe verificar que el valor de  $p$  obtenido debe ser mayor al valor de la significancia para probar que los datos de la muestra se pueden aproximar a una distribución normal (Mendenhall et al., 2015). Este análisis se presenta a continuación en las Figura 3.9, Figura 3.10, Figura 3.11, Figura 3.12, Figura 3.13 y Figura 3.14.

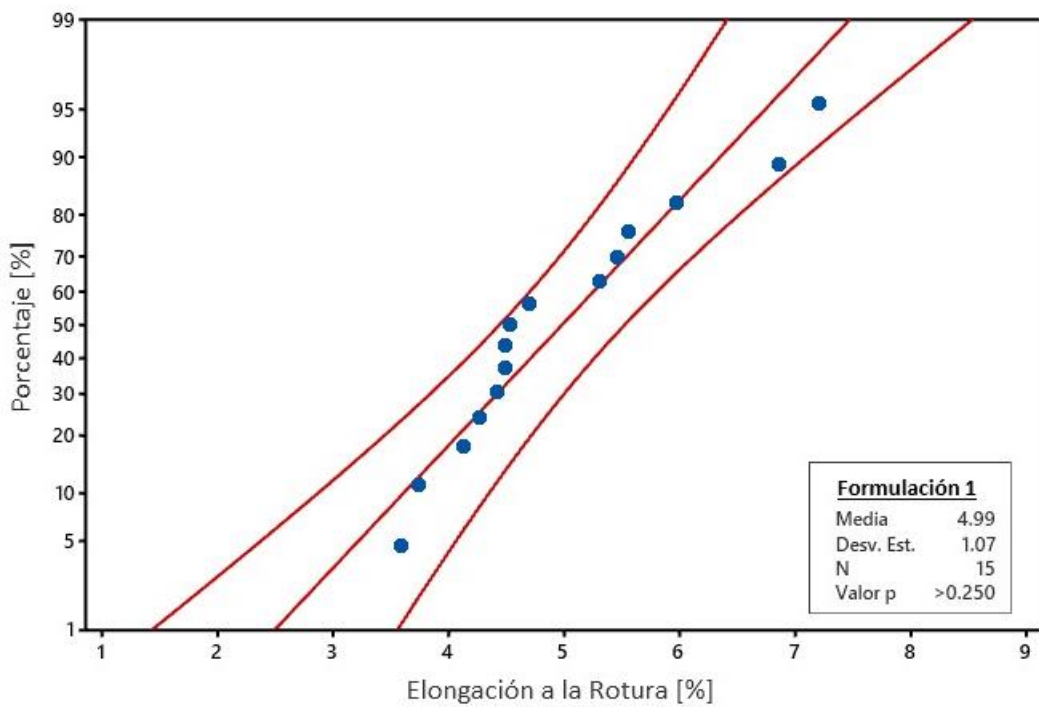


**Figura 3.9:** Gráfica de probabilidad de Módulo de Elasticidad [MPa] - Formulación 1

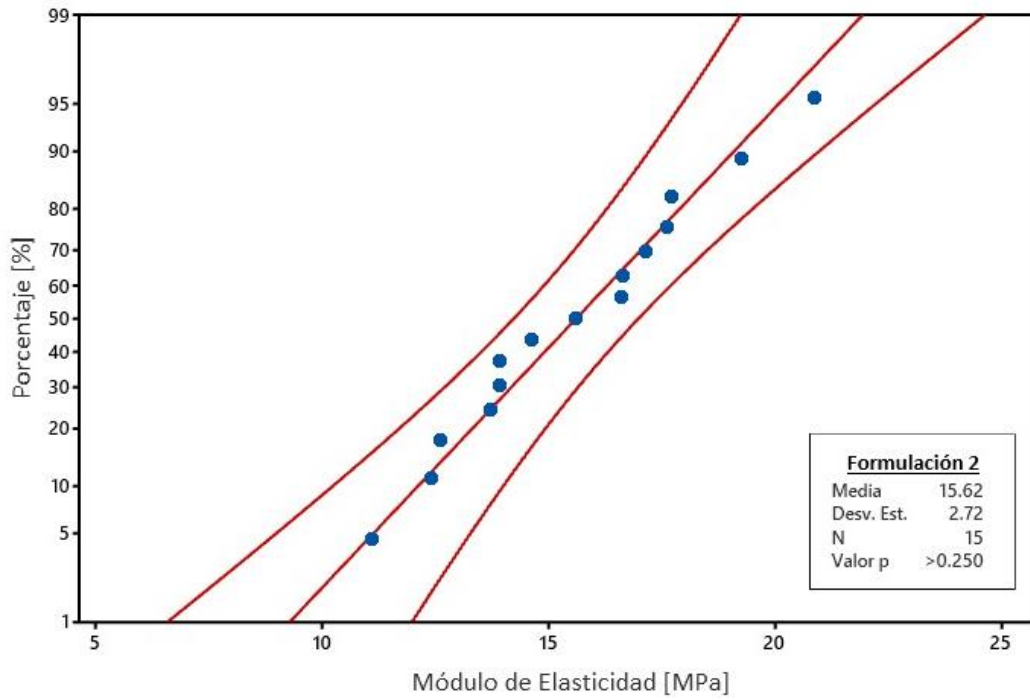




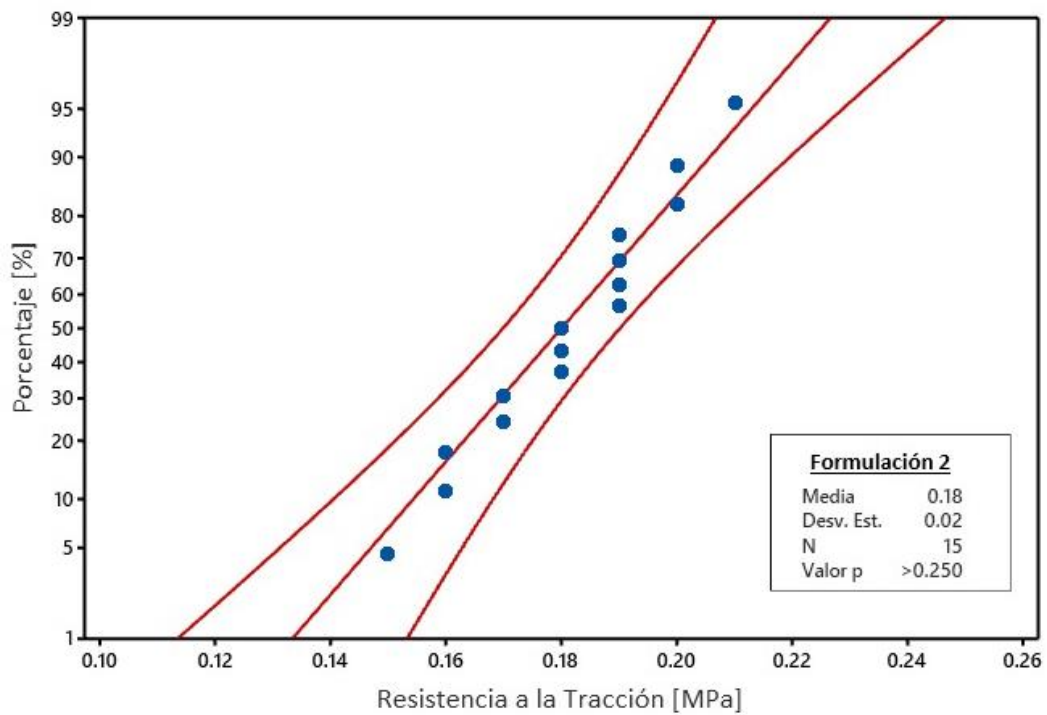
**Figura 3.10:** Gráfica de probabilidad de Resistencia a la Tracción [MPa] - Formulación 1



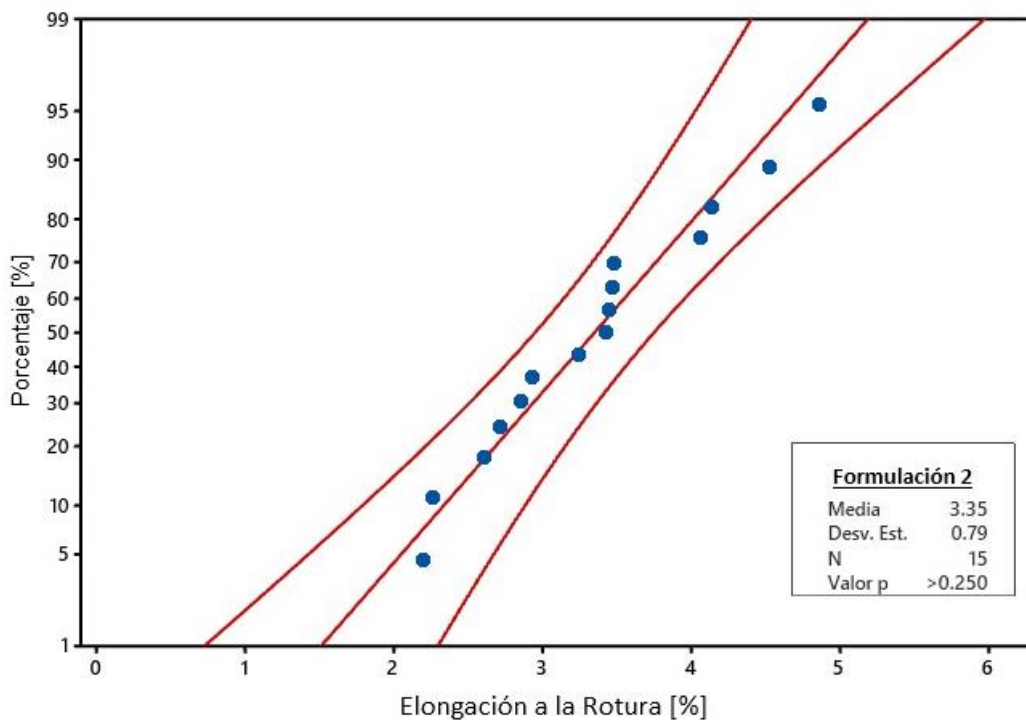
**Figura 3.11:** Gráfica de probabilidad de Elongación a la Rotura [%] - Formulación 1



**Figura 3.12:** Gráfica de probabilidad de Módulo de Elasticidad [MPa] - Formulación 2



**Figura 3.13:** Gráfica de probabilidad de Resistencia a la Tracción [MPa] - Formulación 2



**Figura 3.14:** Gráfica de probabilidad de Elongación a la rotura [%] - Formulación 2

Como se puede observar en las figuras anteriormente mostradas, en ambas formulaciones los datos de todas las propiedades mecánicas se aproximan a una distribución normal, debido a que el valor de  $p$  en todos los casos es mayor que el nivel de significancia de 0,05 (Mendenhall et al., 2015). Adicionalmente, se visualizó en todas las graficas que los datos se encuentran concentrados en los percentiles centrales dentro de un intervalo de confianza del 95%.

Una vez comprobadas las condiciones necesarias para la aplicación de la prueba  $t$  para inferencia estadísticas a partir de muestras pequeñas, se comprobó la hipótesis nula planteada para cada una de las propiedades mecánicas de tracción.

Es importante mencionar que, el valor crítico de  $t$  define una región de rechazo para la hipótesis nula, si el estadístico de prueba cae en la región de rechazó, entonces se concluye que la hipótesis nula quedará rechaza. La región de rechazo depende de la naturaleza de la hipótesis alternativa, para este caso se ha planteó una hipótesis alternativa que define una región de rechazo bilateral, por lo que, la prueba de hipótesis se denomina prueba de dos colas (Mendenhall et al., 2015).

Para realizar la prueba  $t$ , se utilizó el software Microsoft® Excel® 2019 versión 2312, empleando la herramienta de análisis de datos: prueba  $t$  para dos muestras suponiendo varianzas desiguales. En la Tabla 3.3, se presentan los resultados obtenidos.

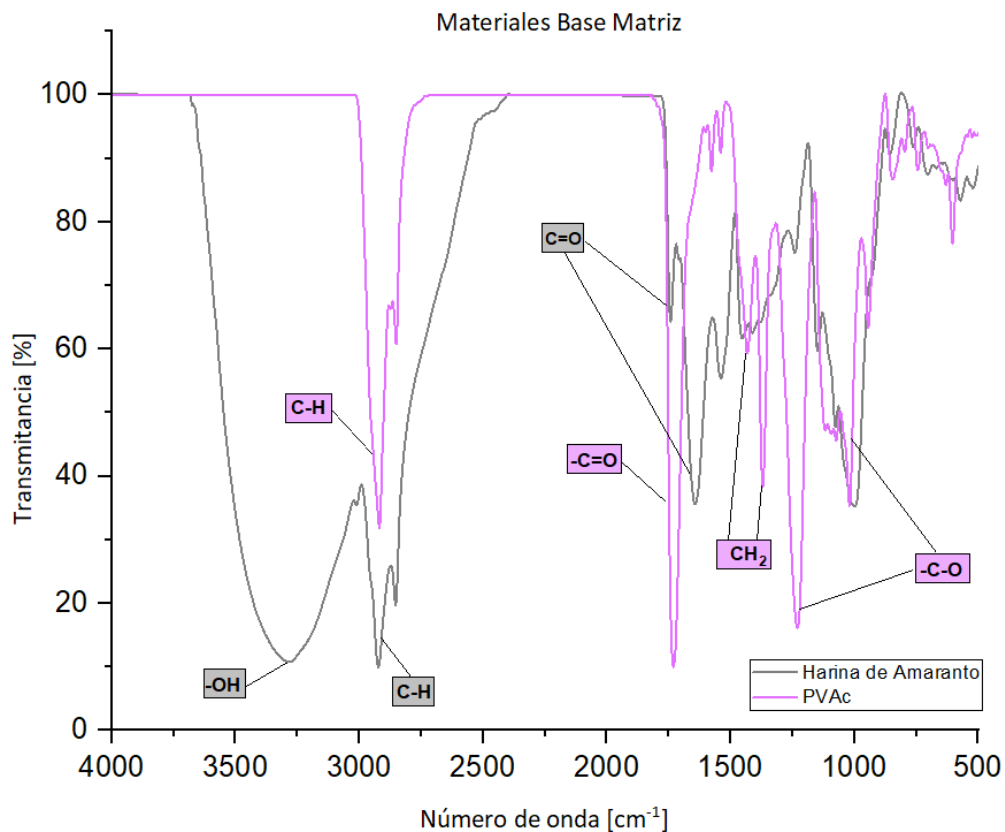
**Tabla 3.2.** Estadístico t para las diferencias entre medias de propiedades mecánicas

Parámetro Estadístico	Fibra: cuesco (10:90)	Fibra: cuesco (20:80)
	<b>Módulo de Elasticidad [Mpa]</b>	
Media	9,21	15,59
Varianza	3,77	7,37
Observaciones ( <i>n</i> )	15,00	15,00
Estadístico <i>t</i>	-7,40	
valor <i>p</i>	$9,34 \times 10^{-8}$	
Valor crítico de <i>t</i> (dos colas)	2,06	
<b>Resistencia a la tracción [MPa]</b>		
Media	0,14	0,18
Varianza	0,00	0,00
Observaciones	15,00	15,00
Estadístico <i>t</i>	-6,67	
valor <i>p</i>	$3,11 \times 10^{-7}$	
Valor crítico de <i>t</i> (dos colas)	2,05	
<b>Elongación a la rotura [%]</b>		
Media	4,99	3,35
Varianza	1,14	0,62
Observaciones	15,00	15,00
Estadístico <i>t</i>	4,79	
valor <i>p</i>	$5,86 \times 10^{-6}$	
Valor crítico de <i>t</i> (dos colas)	2,06	

En función de los resultados obtenidos, se observa que, para las 3 pruebas de hipótesis realizadas, el estadístico de prueba *t* cae en zonas de rechazo de la hipótesis nula, con un riesgo de error (defino por el valor *p*) < 0,01 % para todas las propiedades mecánicas estudiadas. Por lo tanto, la variación de la cantidad de cuesco y fibra de palma africana aplicados en la matriz del composite si afecta a las propiedades mecánicas de tracción.

### 3.1.2 Espectroscopía infrarroja

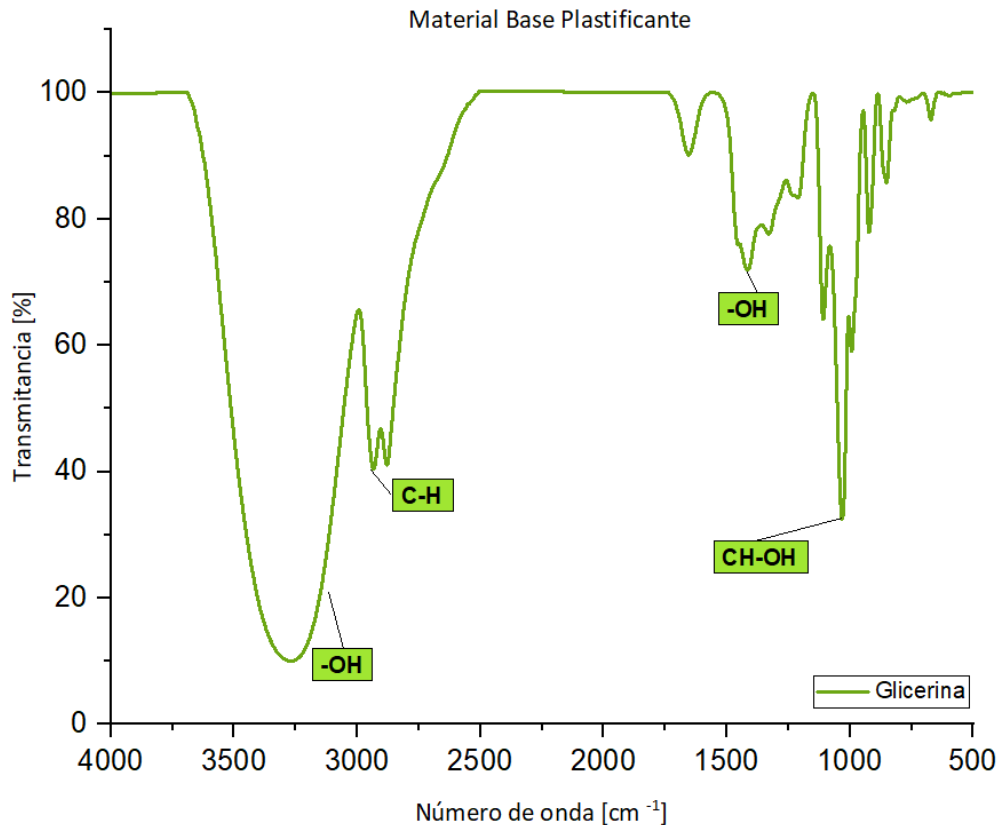
En la Figura 3.15, Figura 3.16 y Figura 3.17 se muestran los espectros infrarrojos de correspondientes a los materiales base de la matriz, el plastificante y el refuerzo, respectivamente.



**Figura 3.15.** Curvas FTIR de los materiales base de la matriz

Al estudiar el espectro infrarrojo del PVA, se observó una primera banda en  $2918\text{ cm}^{-1}$ , la cual se atribuye a las vibraciones de estiramiento de tensión asimétrico del C-H, también se puede identificar una señal en  $1730\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a la vibración de tensión del -C=O la cual hacen referencia a los grupos acetato del PVAc remanentes luego del proceso de hidrólisis realizado para la obtención del PVA. Los picos en  $1432\text{ cm}^{-1}$  y  $1370\text{ cm}^{-1}$  corresponden a la vibración de flexión C-H del  $\text{CH}_2$  y a la vibración de deformación C-H respectivamente. Finalmente, las bandas de  $1229\text{ cm}^{-1}$  y  $1019\text{ cm}^{-1}$  hacen referencia al estiramiento C-O de los grupos acetilo (Kharazmi et al., 2015), (Acik et al., 2019).

Por otro lado, para la harina de amaranto se observa una banda de  $3286\text{ cm}^{-1}$ , la cual está asociada con las vibraciones de estiramiento de los grupos -OH, indicando la presencia de grupos hidroxilo en la harina, también se identifica una señal en  $2922\text{ cm}^{-1}$  donde este pico corresponde a las vibraciones de estiramiento asimétrico de los enlaces C-H, mostrando la presencia de grupos alifáticos, como los grupos metilo ( $\text{CH}_3$ ) o metileno ( $\text{CH}_2$ ). Los siguientes picos en  $1742\text{ cm}^{-1}$  y  $1644\text{ cm}^{-1}$  están relacionados a la presencia de grupos carbonilo (C=O), asociados al almidón de la harina de amaranto (García et al., 2018) (Orsini et al., 2021).



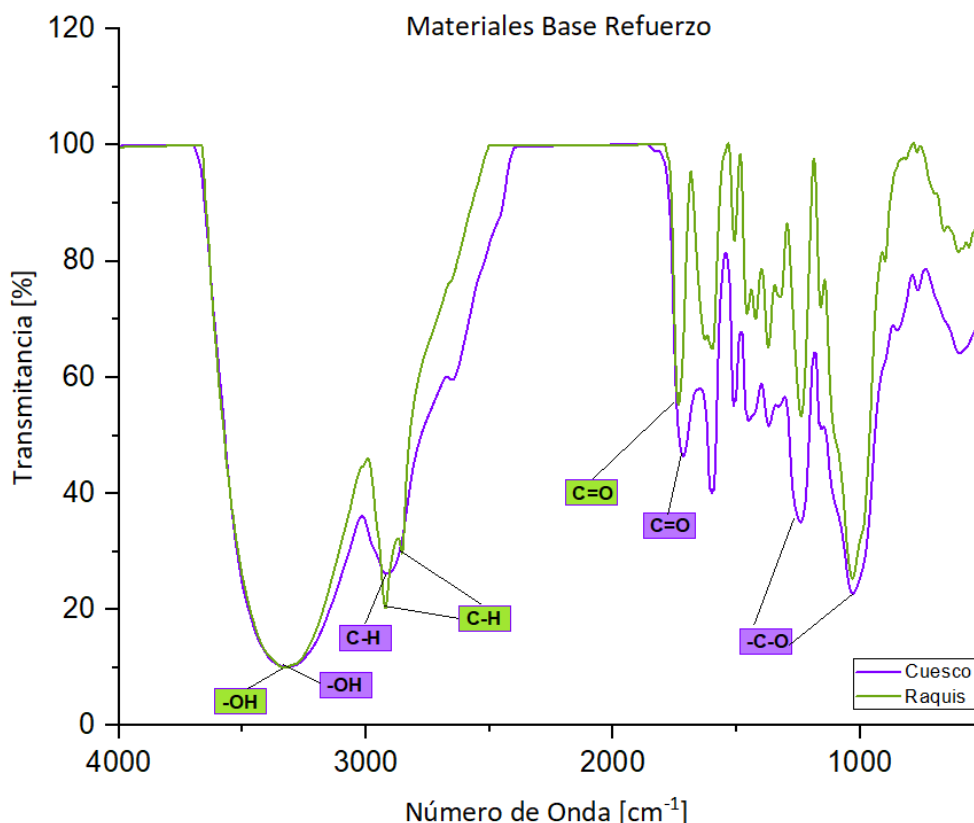
**Figura 3.16.** Curvas FTIR del plastificante (glicerina)

En el espectro del glicerol se observó una primera banda a  $3271\text{ cm}^{-1}$  asociada con la tensión del enlace -OH; también, aparece un pico de  $2933\text{ cm}^{-1}$  el cual hace referencia a los enlaces C-H en la cadena alifática de la glicerina. Luego, en el intervalo de  $1415\text{ cm}^{-1}$  -  $1212\text{ cm}^{-1}$  se tuvo una deformación en el plano del enlace O-H. Finalmente, se observa un pico en  $1030\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a la vibración del enlace CH-OH (Corripio, 2018).

Al realizar una comparación de las materias base (harina de amaranto y PVAc), se observó bandas de absorción similares en las vibraciones de estiramiento asimétrico de los enlaces C-H y el grupo carbonilo C=O; sin embargo, en el caso de PVAc se observó leve desplazamiento hacía un número de onda más bajo de  $2918\text{ cm}^{-1}$  y  $1730\text{ cm}^{-1}$  respectivamente. Así mismo, se identificó que había una diferencia significativa en el pico de absorción a  $3286\text{ cm}^{-1}$  en la harina de amaranto donde este estaba asociado a la vibración de estiramiento de los grupos de los grupos -OH que participan en la formación de hidrógeno; no obstante, al realizar una comparación entre la harina de amaranto y glicerol se tiene que el grupo -OH en el glicerol se movió a un número de onda más bajo ( $3271\text{ cm}^{-1}$ ).

Según Chen et al. (2008), al tener mezclas compuestas por PVAc/almidón/glicerol como es el caso de este estudio, los picos de absorción cambiarán con respecto a los materiales

base originales debido a la plastificación del glicerol y a las interacciones entre el PVAc y las moléculas de almidón en la mezcla y formación del material compuesto. Sin embargo, menciona que la forma y la ubicación de los picos principales en el PVAc no presentan cambios significativos cuando se realiza una mezcla PVAc/almidón; es decir, las interacciones de las moléculas del PVAc son más fuertes, por lo tanto, se considera dominante sobre el almidón (Chen et al., 2008)



**Figura 3.17.** Curvas FTIR de los materiales base del refuerzo

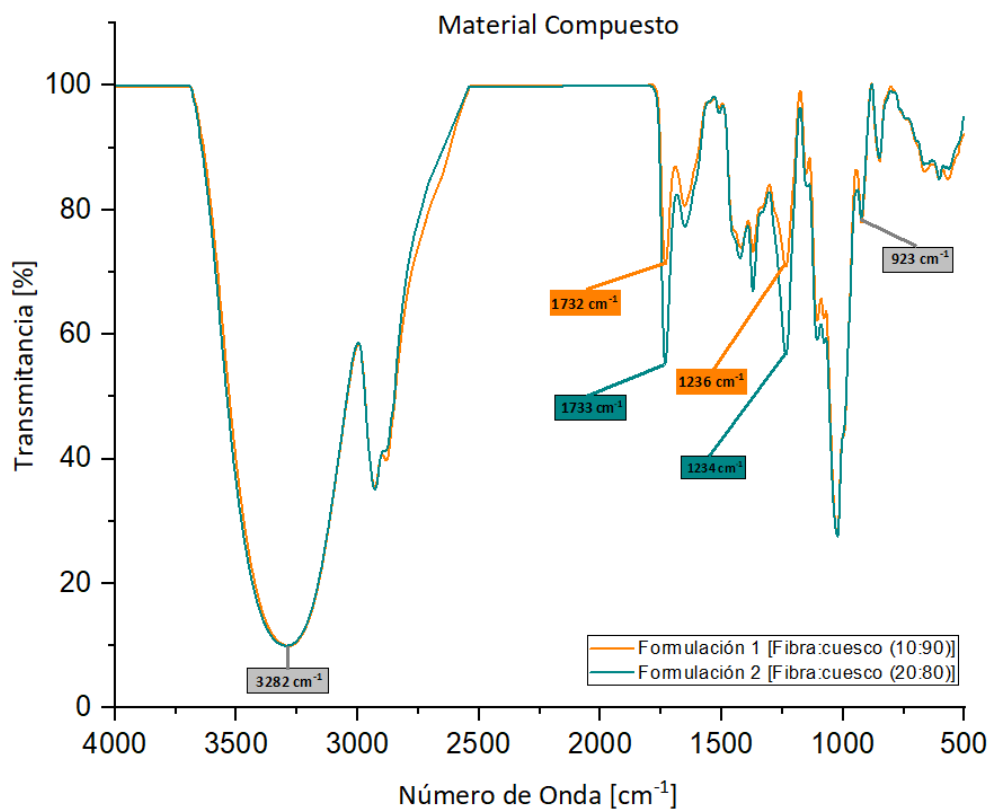
Con respecto al espectro del raquis de palma africana, se observa un pico amplio a  $3329\text{ cm}^{-1}$  debido a las vibraciones de estiramiento de los grupos -OH. Además, los picos a  $2921\text{ cm}^{-1}$  y  $2854\text{ cm}^{-1}$  se relacionan con el estiramiento C-H. El pico de la banda carbonilo (C=O) a  $1730\text{ cm}^{-1}$  representó aldehídos, cetonas o ácidos carboxílicos en las hemicelulosas, mientras que a un número de onda  $1597\text{ cm}^{-1}$  y  $1508\text{ cm}^{-1}$  se atribuyó la posible presencia de bandas características de un esqueleto y anillo aromático como el de la lignina. Finalmente, los picos entre  $1000\text{ cm}^{-1}$  y  $1200\text{ cm}^{-1}$  se deben al posible estiramiento del C-O, C-O-C y a los enlaces C-OH en la celulosa y la lignina (Chaiwong et al., 2019), (Pua et al., 2013), (Hidayah et al., 2012).

El cuesco muestra diferentes intensidades, donde su banda máxima es del grupo -OH a  $3323\text{ cm}^{-1}$ . La intensidad registrada a  $2916\text{ cm}^{-1}$  podría ser atribuida tanto al grupo de

estiramiento C-H de los alcanos como a las vibraciones del grupo metoxi de la lignina. Por otro lado, el pico de intensidad  $1715\text{ cm}^{-1}$  se puede atribuir al estiramiento C=O, o al estiramiento C-C del anillo aromático o del grupo carboxilo de la lignina. Además, los picos entre banda infrarroja entre  $1240 - 1028\text{ cm}^{-1}$  podrían atribuirse al estiramiento C-O de alcoholes, ésteres o éteres (Djomi et al., 2018) (Baby et al., 2019).

Al realizar una comparación de los materiales base en el refuerzo, se observó bandas de absorción similares en las vibraciones de estiramiento de los grupos -OH y C=O; sin embargo, para el raquis se observó un leve desplazamiento hacia un número de onda más alto de  $3329\text{ cm}^{-1}$  y  $1730\text{ cm}^{-1}$  respectivamente, pero la intensidad del pico en el cuesco para el C=O tuvo mayor intensidad comparada con el raquis.

Una vez descritos los espectros de los materiales base utilizados para la elaboración de los biocomposites, en la Figura 3.18 se presenta los espectros de las dos formulaciones elaboradas.



**Figura 3.18.** Curvas FTIR del bio composite

Es fundamental considerar que, al combinar dos o más componentes, las interacciones químicas provocan alteraciones en los picos de los espectros característicos. Tras analizar los materiales base que componen la matriz, el plastificante y el refuerzo, el objetivo es identificar las posibles interacciones que puedan surgir entre cada uno de estos materiales.



En la Figura 3.18 se aprecia una notable similitud entre las dos formulaciones analizadas; no obstante, la formulación 2 exhibe un mayor estiramiento de los picos en ciertas longitudes de onda.

Dado que en ambas formulaciones se empleó la misma composición y proporción, con 35 % matriz (harina de amaranto:PVAc) y 25 % plastificante (glicerol), se observa una gran marcada similitud, específicamente en la banda máxima a  $3282\text{ cm}^{-1}$ . Este resultado indica probable presencia de interacciones de enlace hidrógeno entre el PVAc, el almidón de la harina de amaranto y el glicerol. Estos resultados coinciden con datos obtenidos por Maziad y sus colaboradores, quienes en su estudio sobre mezclas degradables a base de PVAc-almidón-glicerol, también identificaron la misma banda a  $3282\text{ cm}^{-1}$  (Maziad et al., 2018). Además, Phattarateera y su equipo (2023) llevaron a cabo una investigación donde evaluaron mezclas de almidón y PVA, en el cual se demostró la buena compatibilidad entre almidón/PVA debido a las fuertes interacciones entre los enlaces de hidrógeno y los grupos hidroxilo (Phattarateera et al., 2023).

Por otro lado, se observa un pico compartido en ambas formulaciones a  $923\text{ cm}^{-1}$ , indicativo de una mayor absorción de agua en las moléculas de almidón debido a la presencia de glicerol en la mezcla. Este hallazgo concuerda con lo señalado por Agrawal et al. (2023), ya que el glicerol presenta una buena compatibilidad y baja volatilidad, lo que facilita la interacción con enlaces de hidrógeno. Esto resulta en una interacción directa entre el plastificante y el almidón presente en la harina de amaranto, permitiendo la higroscopicidad y generando un efecto adicional en la absorción de humedad (Agrawal et al., 2023).

Además, se observó que en ciertos picos del espectro infrarrojo de la formulación 2 se tuvo una mayor intensidad de las bandas, esto se debe principalmente a las diferentes relaciones de residuos lignocelulósicos (raquis/cuesco) que contiene cada una de las formulaciones. La banda más significativa en los espectros ocurrió a  $1733\text{ cm}^{-1}$  para la formulación 2, y se observó un mínimo desplazamiento hacia un número de onda más bajo de  $1732\text{ cm}^{-1}$  para la formulación 1. Esta longitud de onda es atribuida al grupo carboxilo de la lignina, además debido al porcentaje de transmitancia leído en la Figura 3.18 se puede deducir que la concentración relativa de este grupo funcional en el material compuesto en la formulación 2 es mayor que en la formulación 1.

Finalmente, la última banda significativa se encontró a una longitud de onda de  $1234\text{ cm}^{-1}$  para la formulación 2, donde se observó un desplazamiento mínimo hacia un número de onda más alto de  $1236\text{ cm}^{-1}$  para la formulación 1. Esta longitud de onda es atribuida a los enlaces C-OH en la celulosa y la lignina. Por lo tanto, debido al porcentaje de transmitancia

leído en la Figura 3.18 se puede deducir que existe una mayor concentración relativa de este grupo funcional en la formulación 2.

Lo anteriormente mencionado, podría estar relacionado con la mayor rigidez que presenta el biocomposite con refuerzo 20:80 (formulación 2), ya que la celulosa al poseer una naturaleza cristalina aporta con rigidez a la matriz lo cual se evidencia en un mayor módulo de elasticidad. Además de los componentes ya analizados, es importante mencionar según Raj y Somashekar (2023) el almidón presente en la matriz de PVA cambia las propiedades mecánicas del material; por lo tanto, modifica la estructura del polímero tanto a nivel molecular como morfológico ya que durante la incorporación de cargas pueden producirse imperfecciones en los cristales o distorsiones en la red cristalina, y estos cambios morfológicos repercuten en las propiedades de los materiales compuestos (Raj & Somashekar, 2003).

### **3.2 Conclusiones**

Se determinó que la variación de la cantidad de cuesco y fibra de palma africana aplicados en la matriz del composite tienen una influencia significativa en las propiedades mecánicas de tracción del material elaborado.

La caracterización mecánica evidenció la existencia de tres zonas en las curvas esfuerzo-deformación de los materiales con las formulaciones 1 y 2 donde se observó un comportamiento inicial lineal a bajas deformaciones, seguido de una disminución en la pendiente de la curva que podría estar asociada al inicio y propagación del mecanismo de falla, finalmente una marcada disminución de la pendiente asociada a un comportamiento plástico del material hasta la falla.

A través de la caracterización mecánica se determinó los parámetros de tracción de los composites, donde la variación de la proporción de fibra:cuesco de (10:90) a (20:80) dio como resultado un aumento en el módulo de elasticidad y resistencia a la tracción de 9,21 MPa a 15,62 MPa lo que representa un 69,60 % y 0,14 MPa a 0,18 MPa es decir aumento un 28,57 %. Con respecto a la elongación a la rotura, se observó una disminución de 4,99 % a 3,35 % lo cual representa un 32,87 %. Esto implica que el composite para la formulación 2 presenta una menor ductilidad lo que está directamente relacionado con la mayor concentración de celulosa presente en el material.

Uno de los factores que influyen en la menor resistencia a la tracción en la formulación 1 es débil adhesión interfacial la cual es causada por el carácter hidrofílico de la fibra de raquis y cuesco con la matriz de PVAc que tiene un carácter hidrofóbico.

Los resultados FTIR de biocomposites para la formulación 1 y 2 presentó banda máxima ubicada en la longitud de onda de  $3282\text{ cm}^{-1}$ , la cual está asociado a las interacciones de enlace hidrógeno entre el PVAc, el almidón de la harina de amaranto y el glicerol.

La formulación 2 exhibe una mayor intensidad de los picos en comparación con la formulación 1 en las longitudes de onda:  $1733\text{ cm}^{-1}$  y  $1234\text{ cm}^{-1}$ , estas están atribuidas al grupo carboxilo de la lignina y enlaces C-OH en la celulosa.

### 3.3 Recomendaciones

Aplicación de tratamientos químicos a las fibras de raquis y cuesco de palma africana con la finalidad de mejorar la compatibilidad con la matriz de PVAc.

Realizar ensayos mecánicos que permitan la caracterización del material frente a cargas de flexión, compresión e impacto, con el objetivo de tener una visión clara de los posibles comportamientos en servicio del material, considerando que un elemento mecánico esta sometido a cargas combinadas.

Desarrollo de un procedimiento que permita obtener un biocomposite laminado con fibras orientadas con la finalidad de realizar una comparación de la influencia de este parámetro sobre las propiedades mecánicas de tracción.

Evaluar la influencia del tamaño de partículas utilizadas en el refuerzo del material compuesto, así como la longitud y el diámetro de las fibras de raquis en las propiedades mecánicas de tracción.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulrahman, M., Hasan, Z., Borhana, A., Elfaghi, A., & Ali, Y. (2023). Effect of sugar palm fibers on the properties of blended wheat starch/polyvinyl alcohol (PVA) -based biocomposite films. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 1043–1055. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.027>
- Acik, G., Cansoy, C. E., & Kamaci, M. (2019). Effect of flow rate on wetting and optical properties of electrospun poly(vinyl acetate) micro-fibers. *Colloid and Polymer Science*, 297(1), 77–83. <https://doi.org/10.1007/s00396-018-4443-3>
- Agrawal, P., Sharma, P., Singh, V., & Chauhan, S. (2023). A Comprehensive Review on the Engineering of Biocompatible Polyvinyl Alcohol Composites with Enhanced Properties Using Carbonaceous Fillers. *J. Mater. Environ. Sci*, 2023(5), 560–581. <http://www.jmaterenvironsci.com>
- Akinci, A. (2010). The determining role of inorganic particles on physical and mechanical properties of reinforced polyethylene composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(7), 957–963. <https://doi.org/10.1177/0731684408101426>

- AkmalHakim, M., Husseinsyah, S., Bee Ying, L., & Faizal Abd Rahman, M. (2016). Chemical Modification of Palm Kernel Shell Filled Polylactic Acid Biocomposite Films. In *BioResources* (Vol. 11, Issue 3).
- García, Á., Torres, O. L., & Ariza, H. (2018). Physical-chemical characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), amaranth (*Amaranthus caudatus* L.), and chia (*Salvia hispanica* L.) flours and seeds. *Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira*, 67, 215–222.
- Baby, R., Saifullah, B., & Hussein, M. Z. (2019). Palm Kernel Shell as an effective adsorbent for the treatment of heavy metal contaminated water. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55099-6>
- Boontima, B., Noomhorm, A., Puttanlek, C., Uttapap, D., & Rungsardthong, V. (2015). Mechanical Properties of Sugarcane Bagasse Fiber-Reinforced Soy Based Biocomposites. *Journal of Polymers and the Environment*, 23(1), 97–106. <https://doi.org/10.1007/s10924-014-0679-2>
- Borja, M. (2012). *Metodología de la Investigación Científica para ingenieros*.
- Camacho, S., Castrejón, D., Pineda, O., & Silva, D. (2022). *Impactos de la Palma Africana en el Ecuador*.
- Chai, W. L., Chow, J. D., Chen, C. C., Chuang, F. S., & Lu, W. C. (2009). Evaluation of the biodegradability of polyvinyl alcohol/starch blends: A methodological comparison of environmentally friendly materials. *Journal of Polymers and the Environment*, 17(2), 71–82. <https://doi.org/10.1007/s10924-009-0123-1>
- Chaiwong, W., Samoh, N., Eksomtramage, T., & Kaewtatip, K. (2019). Surface-treated oil palm empty fruit bunch fiber improved tensile strength and water resistance of wheat gluten-based bioplastic. *Composites Part B: Engineering*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107331>
- Chen, Y., Cao, X., Chang, P. R., & Huneault, M. A. (2008). Comparative study on the films of poly(vinyl alcohol)/pea starch nanocrystals and poly(vinyl alcohol)/native pea starch. *Carbohydrate Polymers*, 73(1), 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.10.015>
- Chun, K. S., Husseinsyah, S., & Osman, H. (2013). Properties of coconut shell powder-filled polylactic acid ecomposites: Effect of maleic acid. *Polymer Engineering and Science*, 53(5), 1109–1116. <https://doi.org/10.1002/pen.23359>
- Corripio, R. (2018). *Effect of short wave ultraviolet radiation on selected properties of edible films formulated with pomegranate juice and chitosan* (Vol. 17, Issue 1). <https://www.researchgate.net/publication/320288050>
- Djomi, R., Meva'a, L. J. R., Nganhou, J., Mbobda, G., Njom, A. E., Bampel, Y. D. M., & Tchinda, J.-B. S. (2018). Physicochemical and Thermal Characterization of Dura Palm Kernel Powder as a Load for Polymers: Case of Polyvinyl Chloride. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 06(06), 1–18. <https://doi.org/10.4236/msce.2018.66001>
- Dobircan, L., Sreekumar, P. A., Saiah, R., Leblanc, N., Terrié, C., Gattin, R., & Saiter, J. M. (2009). Wheat flour thermoplastic matrix reinforced by waste cotton fibre: Agro-green-composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(4), 329–334. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.11.004>

- ESIN Consultora S.A. (2014). *Atlas Bioenergético del Ecuador*.
- Ezema Ike-Eze, I. C., Uyor, U. O., Aigbodion, V. S., Omah, A. D., Ude, S. N., & Daniel-Nkpume, C. C. (2019). Tensile and compressive strength of palm kernel shell particle reinforced polyester composites. *Materials Research Express*, 6(11). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4afa>
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. In *Progress in Polymer Science* (Vol. 37, Issue 11, pp. 1552–1596). <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- Fazreen, A., Hanafi, I., Mohamad Kahar Ab, W., Santiagoo, R., Hosta, A., & Sam Sung, T. (2018). Development of New Material Based on Polyvinyl Alcohol/Palm Kernel Shell Powder Biocomposites. *Advances in Environmental Studies*, 2(2). <https://doi.org/10.36959/742/208>
- Fedepalma. (2023). *Guía Ambiental para el Subsector de la Agroindustria de la palma de Aceite*.
- 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>
- Gopalakrishnan, P., Saiah, R., Gattin, R., & Saiter, J. M. (2008). Effect of mercerization of flax fibers on wheat flour/flax fiber biocomposite with respect to thermal and tensile properties. *Composite Interfaces*, 15(7–9), 759–770. <https://doi.org/10.1163/156855408786778348>
- Hao, X., Zhou, H., Mu, B., Chen, L., Guo, Q., Yi, X., Sun, L., Wang, Q., & Ou, R. (2020). Effects of fiber geometry and orientation distribution on the anisotropy of mechanical properties, creep behavior, and thermal expansion of natural fiber/HDPE composites. *Composites Part B: Engineering*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107778>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & del Pilar Baptista Lucio, M. (2018). *Metodología de la investigación, 5ta Ed.* [www.FreeLibros.com](http://www.FreeLibros.com)
- Hidayah, N., Samsus, A., Faezah, K., Nazli, M., & Nishida, H. (2012). *Physicochemical property changes of oil palm mesocarp fibers treated with high-pressure steam*.
- James, E., Muth, D., & Applications, M. (2019). Practical Statistics for Pharmaceutical Analysis. In *AAPS Advances in the Pharmaceutical Sciences Series* (Vol. 40). <http://www.springer.com/series/8825>
- Kharazmi, A., Faraji, N., Hussin, R. M., Saion, E., Yunus, W. M. M., & Behzad, K. (2015). Structural, optical, opto-thermal and thermal properties of ZnS-PVA nanofluids synthesized through a radiolytic approach. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6(1), 529–536. <https://doi.org/10.3762/bjnano.6.55>
- Kufel, A., & Kuciel, S. (2020). Hybrid composites based on polypropylene with basalt/hazelnut shell fillers: The influence of temperature, thermal aging, and water absorption on mechanical properties. *Polymers*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/polym12010018>

- Kumar, D., Sankar, P., Kamalakannan, R., & Rajkumar, R. (2023). Retracted: Improving the Mechanical Properties of Natural Fiber Composites of Hemp Fiber with Ramie and Banana Fiber through Compression Molding Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2023, 1–1. <https://doi.org/10.1155/2023/9804915>
- Marmolejo, F., & Tian, S. (2010). The shifting boxplot. A boxplot based on essential summary statistics around the mean. El diagrama de caja cambiante. Un diagrama de caja basado en sumarios estadísticos alrededor de la media. *International Journal of Psychological Research*, 3(1), 37–45. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=299023509011>
- Maziad, N. A., El-Deen Abd El-Aziz, A. B., El-Hamouly, S., Abd El-Aziz Mahmoud El-Hashish, M., Rizk, S. A., & Nasef, N. R. (2018). Characterization of Radiation Prepared Copolymer and Studies of Their Biodegradability. *Journal of Biosciences and Medicines*, 06(02), 33–56. <https://doi.org/10.4236/jbm.2018.62004>
- Mendenhall, W., Beaver, R., & Beaver, B. (2015). *Introducción a la probabilidad y estadística*. <http://latinoamerica.cengage.com>
- Menossi, M., Cisneros, M., Alvarez, V. A., & Casalongué, C. (2021). *Current and emerging biodegradable mulch films based on polysaccharide bio-composites. A review*. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00685-0/Published>
- Milagros, C., Yangali, J., Guerrero, M., Lozada, O., Acuña, L., & Arellano, C. (2020). *La investigación científica: una aproximación para estudios de posgrado*.
- Mohammad, J. (2018). *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (Elsevier, Vol. 2). WoodHead.
- Mohammed, Z. (2021). A review on natural fiber bio-composites, surface modifications and applications. In *Molecules* (Vol. 26, Issue 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules26020404>
- Mott, R. (2009). *Resistencia de Materiales\_5ta\_Ed\_ROBERT*.
- Nabinejad, O., Sujan, D., Rahman, M. E., & Davies, I. J. (2015). Effect of oil palm shell powder on the mechanical performance and thermal stability of polyester composites. *Materials and Design*, 65, 823–830. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.080>
- Nurazzi, N. M., Asyraf, M. R. M., Fatimah Athiyah, S., Shazleen, S. S., Rafiqah, S. A., Harussani, M. M., Kamarudin, S. H., Razman, M. R., Rahmah, M., Zainudin, E. S., Ilyas, R. A., Aisyah, H. A., Norrrahim, M. N. F., Abdullah, N., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). A review on mechanical performance of hybrid natural fiber polymer composites for structural applications. In *Polymers* (Vol. 13, Issue 13). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym13132170>
- Orsini, D., Milena, S., Aparicio, P., & Patricia, G. (2021). *Fourier transformed infrared spectroscopy (FT-IR) for analyzing wheat, flour, corn starch and cassava starch*.
- Phattarateera, S., Xin, L., Amphong, C., Limsamran, V., & Threepopnatkul, P. (2023). Comparative studies of starch blends on the properties of PVA films. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100340>

- Proudfoot, K. (2023). Inductive/Deductive Hybrid Thematic Analysis in Mixed Methods Research. *Journal of Mixed Methods Research*, 17(3), 308–326. <https://doi.org/10.1177/15586898221126816>
- Pua, F., Zakaria, S., Huachia, C., & Rosenau, T. (2013). *Solvolytic Liquefaction of Oil Palm Empty Fruit Bunch (EFB) Fibres: Analysis of Product Fractions Using FTIR and Pyrolysis-GCMS*.
- Raj, B., & Somashekar, R. (2003). *Structure-Property Relation in Polyvinyl Alcohol/Starch Composites*.
- Saenghirunwattana, P., Noomhorm, A., & Rungsardthong, V. (2014). Mechanical properties of soy protein based “green” composites reinforced with surface modified cornhusk fiber. *Industrial Crops and Products*, 60, 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.010>
- Sahari, J., & Maleque, M. A. (2016). Mechanical Properties of Oil Palm Shell Composites. *International Journal of Polymer Science*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/7457506>
- Shinoj, S., Visvanathan, R., Panigrahi, S., & Kochubabu, M. (2011). Oil palm fiber (OPF) and its composites: A review. In *Industrial Crops and Products* (Vol. 33, Issue 1, pp. 7–22). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.09.009>
- Sreekala, M. S., George, J., Kumaran, M. G., & Thomas, S. (2001). *The mechanical performance of hybrid phenol-formaldehyde-based composites reinforced with glass and oil palm fibres*. [www.elsevier.com/locate/compscitech](http://www.elsevier.com/locate/compscitech)
- Tapia-Blácido, D., Sobral, P. J., & Menegalli, F. C. (2005). Development and characterization of biofilms based on Amaranth flour (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Food Engineering*, 67(1–2), 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.054>
- Theophanides, T. (2012). *Infrared Spectroscopy: Materials Science, Engineering and Technology*. In Tech.
- Țucureanu, V., Matei, A., & Avram, A. M. (2016). FTIR Spectroscopy for Carbon Family Study. In *Critical Reviews in Analytical Chemistry* (Vol. 46, Issue 6, pp. 502–520). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/10408347.2016.1157013>
- William, C., & Rethwisch, D. (2009). *Characteristics of Selected Elements*.
- Yong, L., Wong, T., Yin, C., & Kar, C. (2021). A review on cellulose nanocrystals production and characterization methods from *Elaeis guineensis* empty fruit bunches. *Arabian Journal of Chemistry*.

## 5 ANEXOS

### ANEXO I. Análisis gráfico

#### Formulación 1: Curvas descartadas

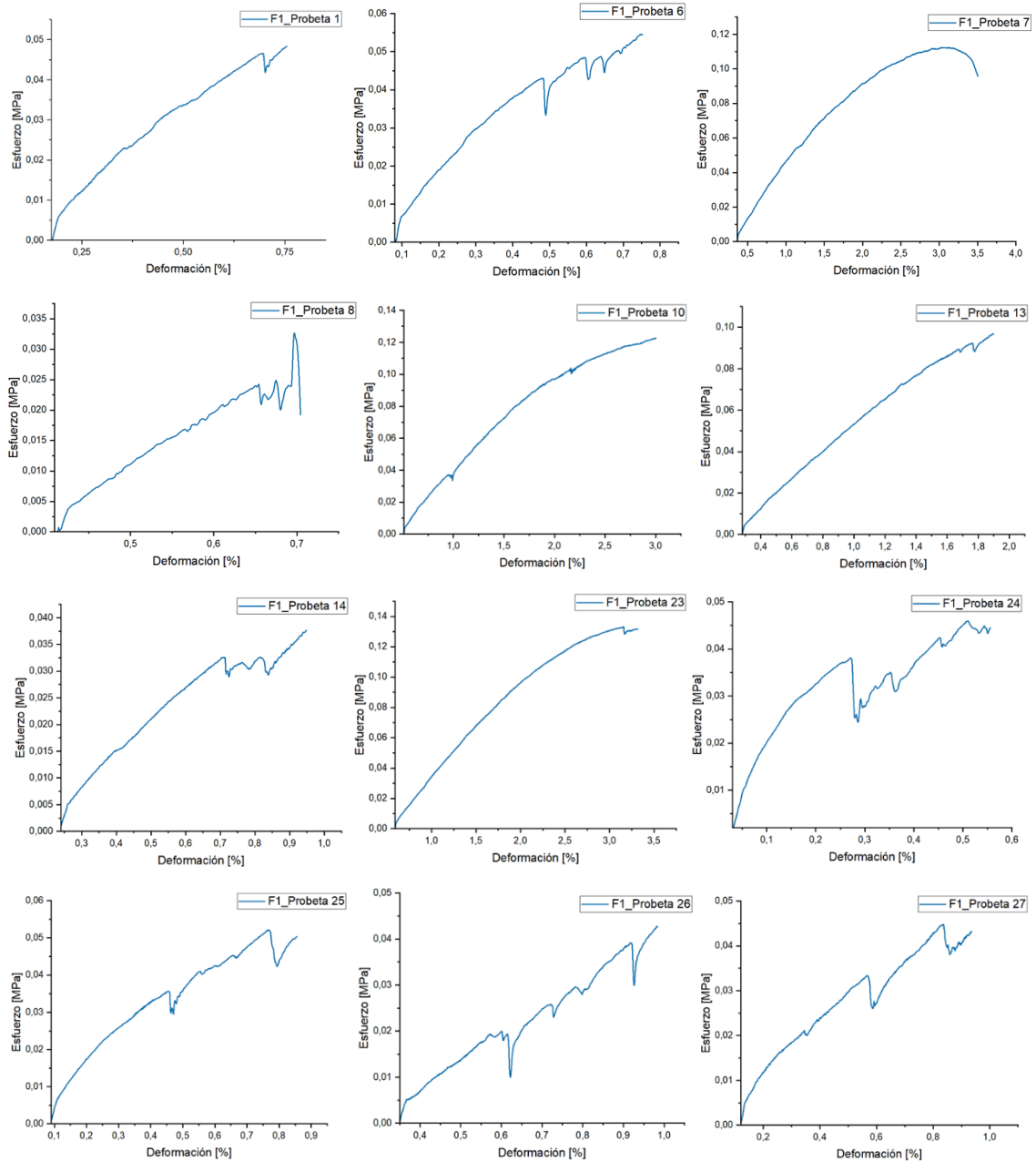


Figura A.1. Curvas esfuerzo-deformación "descartadas" (Análisis Gráfico)



## Formulación 2: Curvas descartadas

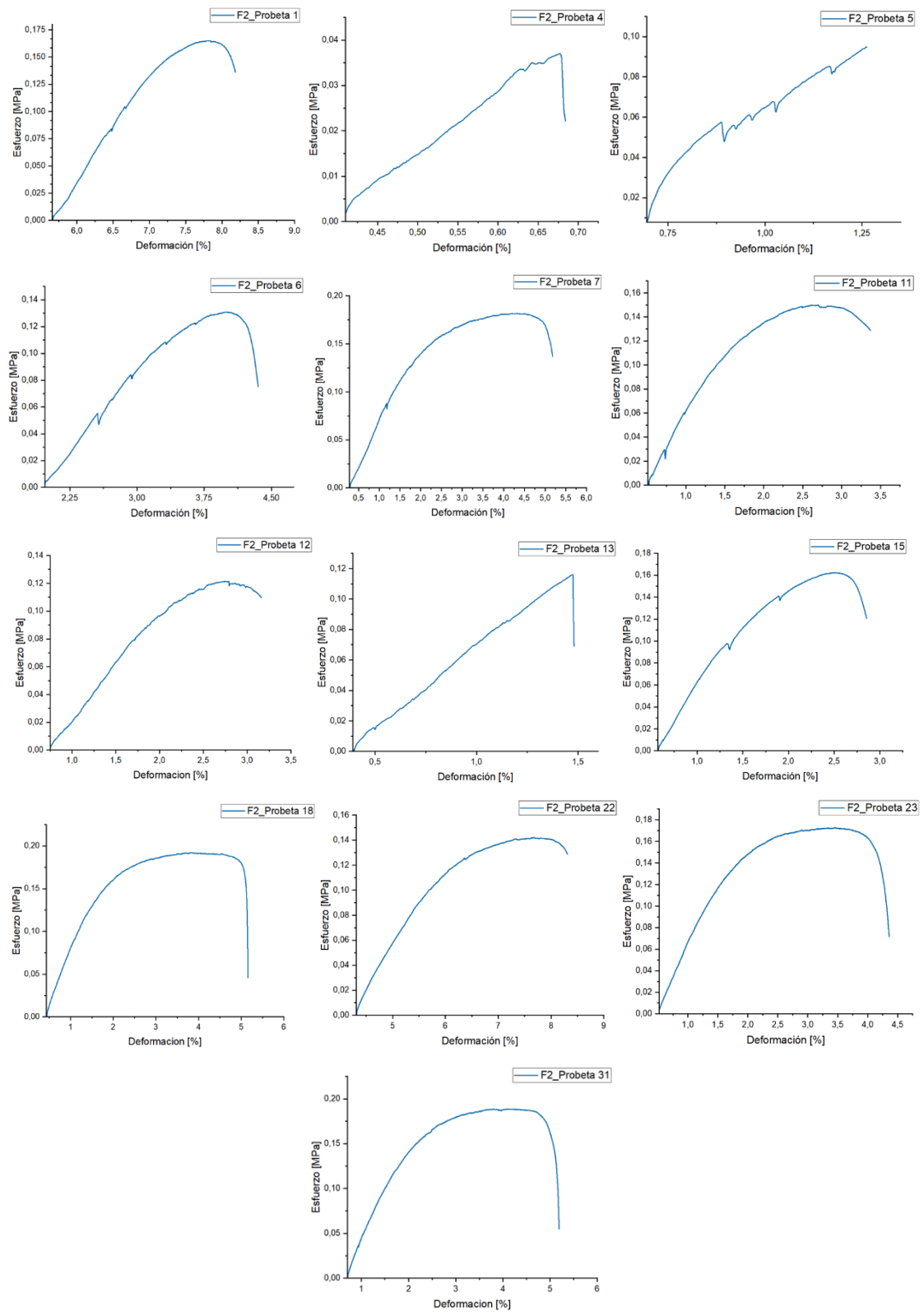


Figura A.2. Curvas esfuerzo-deformación "descartadas" (Análisis Gráfico)

ANEXO II. Análisis estadístico descriptivo

**Formulación 1: Datos Experimentales Obtenidos**

**Tabla A.1.** Resultados experimentales obtenidos – Formulación 1

No Probeta	Módulo de Elasticidad [MPa]	Resistencia a la Tracción [MPa]	Elongación a la Rotura [%]
2	11,07	0,15	3,6
3	9,45	0,14	4,53
4	11,51	0,14	3,75
9	8,01	0,14	5,47
11	6,42	0,12	4,5
12	8,74	0,15	5,56
15	11,14	0,14	4,14
16	7,88	0,13	6,87
17	9,21	0,13	4,7
18	7,11	0,14	7,21
19	6,63	0,13	5,97
20	11,61	0,17	5,31
21	11,7	0,16	4,5
22	10,55	0,17	4,27
28	7,15	0,13	4,42

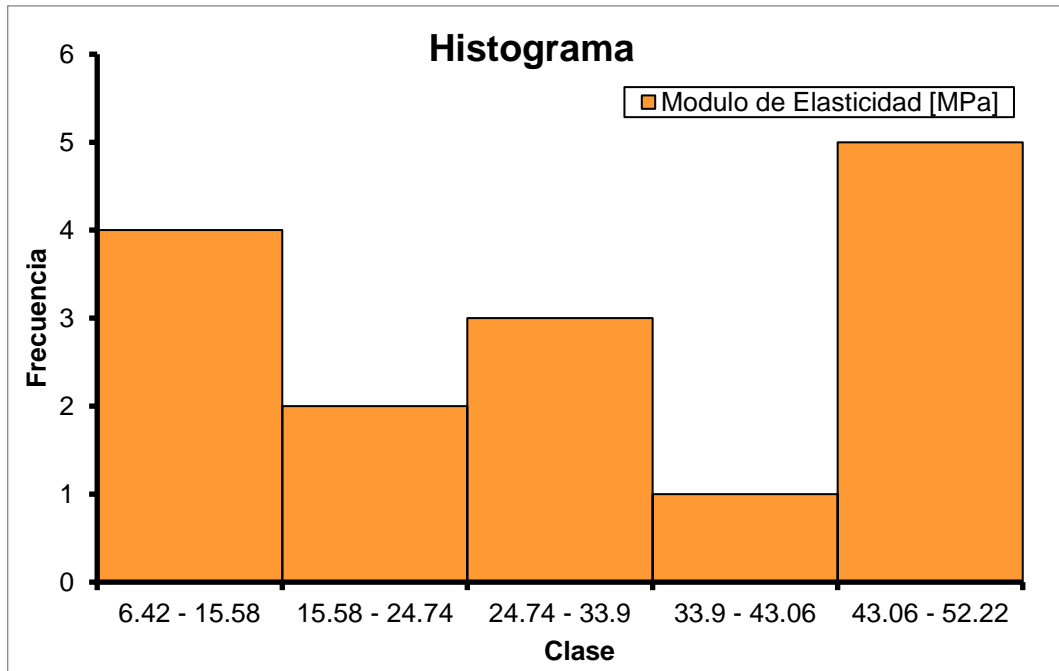
**Variable:** Módulo de elasticidad

**Tabla A.2:** Análisis para elaboración de tabla de frecuencias – módulo de elasticidad

<b>Módulo de Elasticidad</b>	
Numero de Datos	15
Rango	5.28
# Clases	5
Rango de Clases	9.16

**Tabla A.3:** Tabla de frecuencias- módulo de elasticidad

<b>Tabla de Frecuencias</b>			
LIC	LSC	Frecuencias Absolutas	Frecuencias Relativas
6.42	15.58	4	26.67%
15.58	24.74	2	13.33%
24.74	33.9	3	20.00%
33.9	43.06	1	6.67%
43.06	52.22	5	33.33%
6.42	15.58	4	26.67%



**Figura A.1.** Histograma – Módulo de Elasticidad

**Tabla A.4:** Resultados obtenidos de la estadística descriptiva -módulo de elasticidad

<b>Módulo de Elasticidad [MPa]</b>	
Media	9.21
Error típico	0.50
Mediana	9.21
Moda	N/A
Desviación estándar	1.94

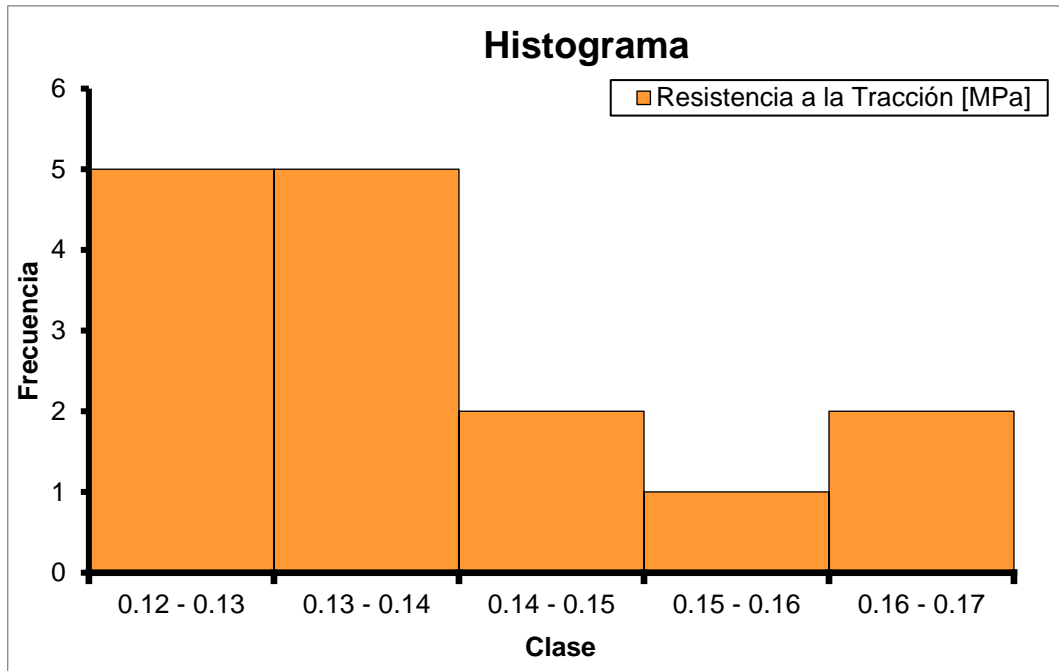
**Variable:** Resistencia a la tracción

**Tabla A.5:** Análisis para elaboración de tabla de frecuencias – resistencia a la tracción

<b>Resistencia a la Tracción</b>	
Numero de Datos	15
Rango	0.05
# Clases	5
Rango de Clases	0.01

**Tabla A.6:** Tabla de frecuencias – resistencia a la tracción

<b>Tabla de Frecuencias</b>			
<b>LIC</b>	<b>LSC</b>	<b>Frecuencia Absoluta</b>	<b>Frecuencias Relativas</b>
0.12	0.13	5	33.33%
0.13	0.14	5	33.33%
0.14	0.15	2	13.33%
0.15	0.16	1	6.67%
0.16	0.17	2	13.33%



**Figura A.2.** Histograma – Resistencia a la Tracción

**Tabla A.7.** Resultados obtenidos de la estadística descriptiva- resistencia a la tracción

Resistencia a la Tracción [MPa]	
Media	0.14
Error típico	$4 \times 10^{-3}$
Mediana	0.14
Moda	0.14
Desviación estándar	0.01

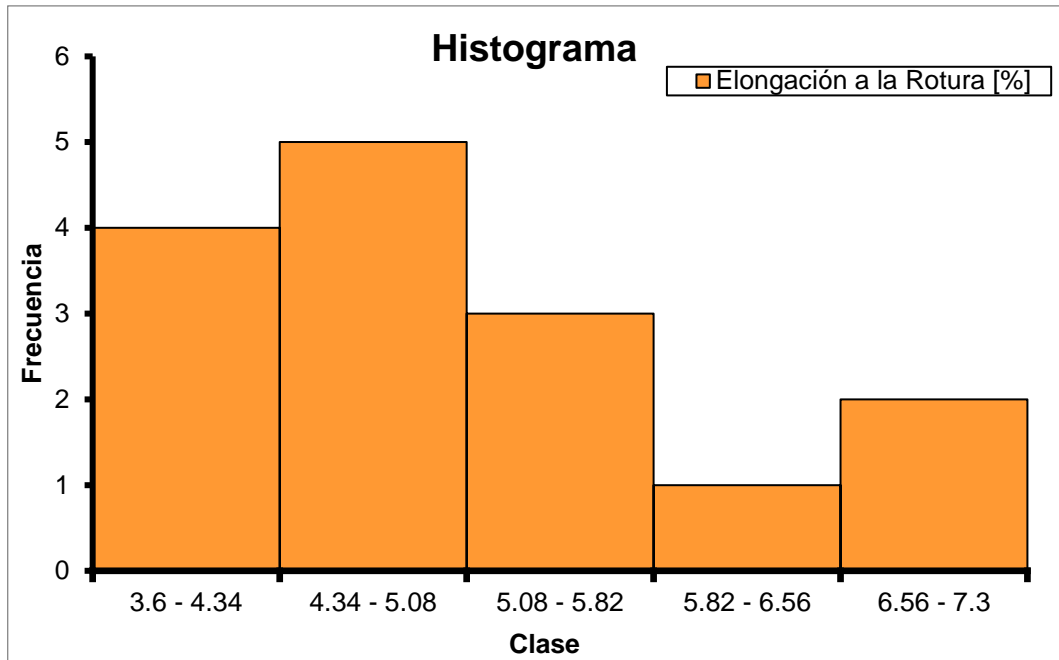
**Variable:** Elongación a la rotura

**Tabla A.8.** Análisis para elaboración de tabla de frecuencias – elongación a la rotura

Elongación a la Rotura [%]	
Numero de Datos	15
Rango	3.61
# Clases	5
Rango de Clases	0.74

**Tabla A.9.** Tabla de frecuencias – elongación a la rotura

Tabla de Frecuencias			
LIC	LSC	Frecuencia Absoluta	Frecuencias Relativas
3.60	4.34	4	26.67%
4.34	5.08	5	33.33%
5.08	5.82	3	20.00%
5.82	6.56	1	6.67%
6.56	7.30	2	13.33%



**Figura A.1.** Histograma – Elongación a la Rotura

**Tabla A.10.** Resultados obtenidos de la estadística descriptiva-elongación a la rotura

<b>Elongación a la Rotura [%]</b>	
Media	4.99
Error típico	0.28
Mediana	4.53
Moda	4.50
Desviación estándar	1.07

**Formulación 2: Datos Experimentales Obtenidos**

**Tabla A.11.** Resultados experimentales obtenidos – formulación 2

<b>No Probeta</b>	<b>Módulo de Elasticidad [MPa]</b>	<b>Resistencia a la Tracción [MPa]</b>	<b>Elongación a la Rotura [%]</b>
2	20,87	0,19	2,93
3	17,14	0,2	4,86
8	16,6	0,18	2,85
10	12,62	0,18	4,52
14	13,94	0,19	4,06
17	16,63	0,17	2,26
19	17,61	0,19	3,45
21	19,28	0,21	3,24
24	14,62	0,16	2,2
25	17,71	0,19	4,14
26	12,43	0,15	2,61
27	15,62	0,18	3,47
28	13,93	0,17	3,42
29	11,12	0,16	2,71
30	13,74	0,2	3,48

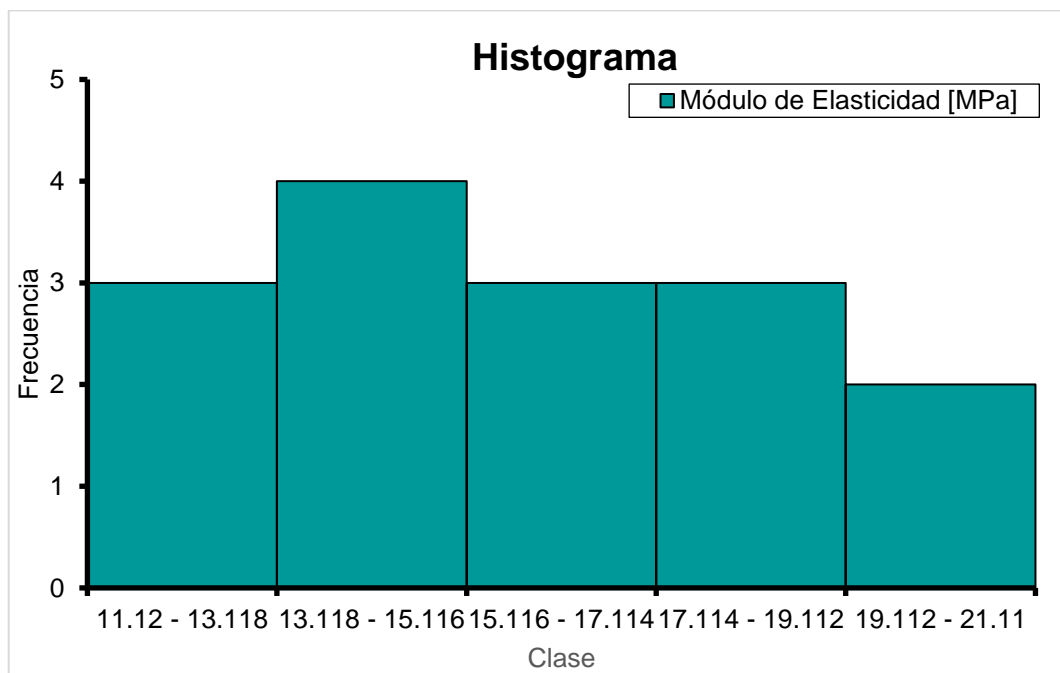
**Variable:** Módulo de elasticidad

**Tabla A.12:** Análisis para elaboración de tabla de frecuencias – módulo de elasticidad

<b>Módulo de Elasticidad [MPa]</b>	
Número de Datos	15
Rango	9.75
# Clases	4.88
Rango de Clases	1.99

**Tabla A.13.**Tabla de frecuencias – módulo de elasticidad

<b>Tabla de Frecuencias</b>			
<b>LIC</b>	<b>LSC</b>	<b>Frecuencia Absoluta</b>	<b>Frecuencias Relativas</b>
11.12	13.12	3	20.00%
13.12	15.12	4	26.67%
15.12	17.11	3	20.00%
17.11	19.11	3	20.00%
19.11	21.11	2	13.33%



**Figura A.2.** Histograma – Módulo de Elasticidad

**Tabla A.14.** Resultados obtenidos de la estadística descriptiva- módulo de elasticidad

<b>Módulo de Elasticidad [MPa]</b>	
Media	15.59
Error típico	0.70
Mediana	15.62
Moda	N/A
Desviación estándar	2.72

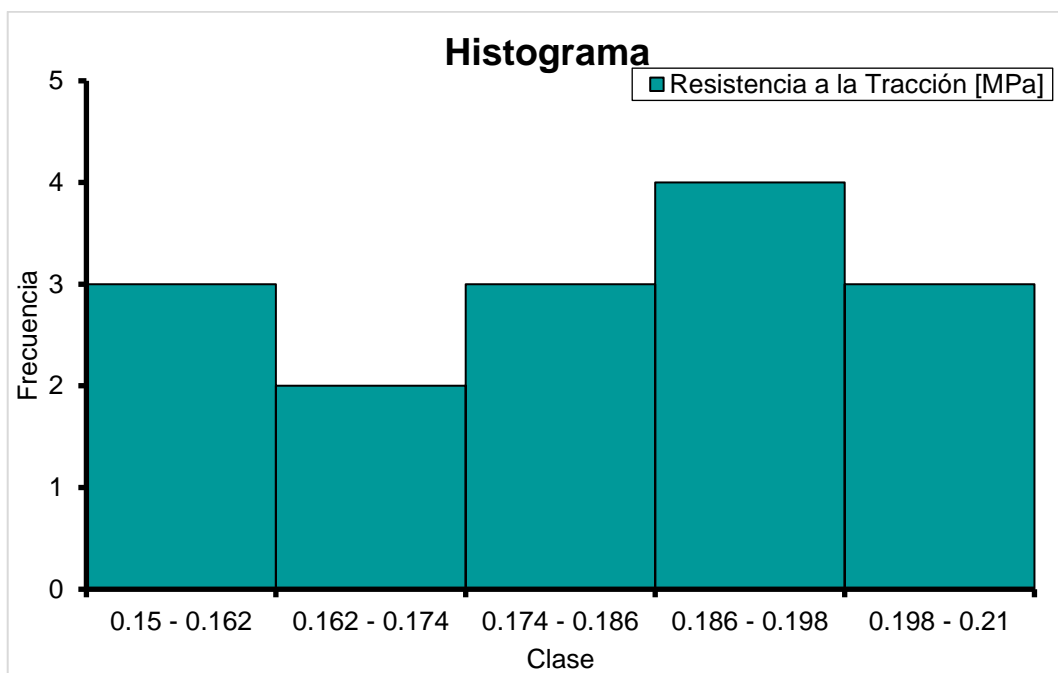
**Variable:** Resistencia a la tracción

**Tabla A.15.** Análisis para elaboración de tabla de frecuencias – resistencia a la tracción

<b>Resistencia a la Tracción [MPa]</b>	
Numero de Datos	15
Rango	0.06
# Clases	5
Rango de Clases	0.012

**Tabla A.16.** Tabla de frecuencias – resistencia a la tracción

<b>Tabla de frecuencias</b>			
<b>LIC</b>	<b>LSC</b>	<b>Frecuencia Absoluta</b>	<b>Frecuencias Relativas</b>
0.15	0.16	3	20.00%
0.16	0.17	2	13.33%
0.17	0.18	3	20.00%
0.19	0.19	4	26.67%
0.19	0.21	3	20.00%



**Figura A.3:** Histograma – Resistencia a la Tracción

**Tabla A.17.** Resultados obtenidos de la estadística descriptiva-resistencia a tracción

<b>Resistencia a la Tracción [MPa]</b>	
Media	0.18
Error típico	$4 \times 10^{-3}$
Mediana	0.18
Moda	0.19
Desviación estándar	0.02

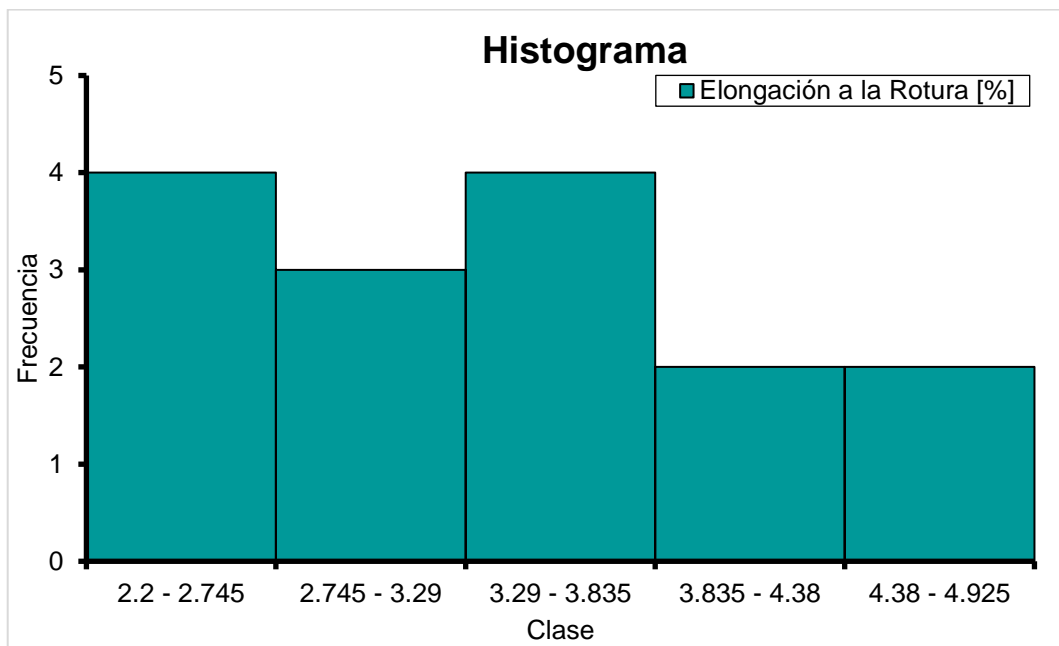
**Variable:** Elongación a la rotura

**Tabla A.18.** Análisis para elaboración de tabla de frecuencias – elongación a la rotura

<b>Elongación a la Rotura [%]</b>	
Número de Datos	15
Rango	2.66
# Clases	4.88
Rango de Clases	0.55

**Tabla A.19.** Tabla de frecuencias – elongación a la rotura

<b>Tabla de Frecuencias</b>			
<b>LIC</b>	<b>LSC</b>	<b>Frecuencia Absoluta</b>	<b>Frecuencias Relativas</b>
2.2	2.75	4	26.67%
2.75	3.29	3	20.00%
3.29	3.84	4	26.67%
3.84	4.38	2	13.33%
4.38	4.93	2	13.33%



**Figura A.6.** Histograma – Elongación a la Rotura

**Tabla A.20:** Resultados obtenidos de la estadística descriptiva-elongación a la rotura

<b>Elongación a la Rotura [%]</b>	
Media	3.35
Error típico	0.20
Mediana	3.42
Moda	#N/D
Desviación estándar	0.79