

Desarrollo de actividades experimentales en el marco del proyecto VIE-3954 para determinar el índice de cristalinidad y el área de la sección transversal de hilos de fique crudos y tratados

Nicolás David Díaz Zambrano

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

José Miguel Benjumea Royero
Ph.D. en Ingeniería Civil y Ambiental

Codirector 1

Germán Adolfo Díaz Ramírez
Ph.D. en Ingeniería de Materiales

Codirector 2

Ricardo Alfredo Cruz Hernández
Ph.D. en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Ingeniería Civil
Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios Padre Todopoderoso, quien me dio el regalo de la vida y la salud con la que cada día me levanto a perseguir mis sueños. Él está siempre con nosotros, guiándonos en nuestro camino, recordándonos que "todo pasa por algo".

A mis amados padres, quienes fueron mi mayor fuente de apoyo y motivación durante todo mi proceso formativo, inculcándome los valores necesarios para cumplir las metas que me proponga. Este logro es también suyo.

A Daniela, por ser mi fuente de apoyo emocional durante toda la carrera, por siempre creer en mí incluso más de lo que yo lo hacía, y por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas. A ella le estaré eternamente agradecido.

A mi gato Ramón (Monchito), quien pereció en los días en que estaba culminando este trabajo de grado. Él siempre estuvo para mí, brindándome alegría y tranquilidad cuando necesitaba un respiro. Siempre me dio su amor, el amor más puro que puede existir. A él le dedico este logro; aunque esté triste, sé que siempre me acompañará. Vuela alto y descansa en paz, Monchito.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por proveerme todos los recursos necesarios para llevar a cabo este trabajo de manera eficiente y efectiva.

A mi director y codirectores de trabajo de grado, a quienes admiro profundamente y agradezco por su guía y acompañamiento durante todo este proyecto. Sus consejos, recomendaciones e incluso sus regaños fueron vitales para el desarrollo del proyecto y mi crecimiento personal y profesional.

A todos los docentes que formaron parte de mi proceso de formación, quienes me ofrecieron el conocimiento y la orientación necesarios para optar por el título de profesional en Ingeniería Civil.

A cada laboratorio, escuela, técnico, profesor, secretaria, compañero y, en general, a cada persona e institución que contribuyó significativamente en el desarrollo de este trabajo. Con mención especial al Laboratorio de Nanotecnología de la UPB y su técnico Víctor Hugo Cuellar, quienes aportaron en la toma de datos del proyecto y ayudaron con una reducción en el costo de los servicios.

A mis padres, hermanos y familiares cercanos, quienes siempre me han alentado a salir adelante y me han apoyado en cada aspecto que he necesitado. Gracias por su amor y por su confianza.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco Teórico y Antecedentes	16
2.1 Fibras de Fique.....	16
2.2 Microscopía Electrónica de Barrido y sus Aplicaciones en la Caracterización de las Fibras de Fique	18
2.3 Difracción de Rayos X y su Aplicación en la Caracterización de Fibras de Fique	19
3. Preparación de probetas para los ensayos de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido	21
3.1 Probetas para ensayos DRX.....	21
3.2 Probetas para las microscopías del área de los hilos.....	23
4. Gestión de la ejecución de los ensayos	26
4.1 Gestión de los ensayos DRX.....	26
4.2 Gestión de las micrografías.....	27
5. Procesamiento de las micrografías y código empleado para la determinación de las áreas	28
6. Resultados	34
6.1 Espectro de difracción de rayos X e índice de cristalinidad (IC)	34
6.2 Áreas calculadas.....	37

6.2.1 Áreas y diámetros aparentes de los hilos	37
6.2.2 Áreas y diámetros aparentes de los filamentos	40
7. Conclusiones	44
Referencias Bibliográficas	46
Apéndices.....	50

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades generales de la fibra de fique.....	17
Tabla 2. Intensidades relativas e índices de cristalinidad en fibras de fique crudas y mercerizadas	36
Tabla 3. Intensidades relativas e índices de cristalinidad en fibras naturales brasileñas crudas y mercerizadas	36
Tabla 4. Áreas y diámetros aparentes de cada filamento según el tipo de hilo	43

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Microscopía en fibras de coco fracturadas bajo diferentes tasas de deformación.....	19
Figura 2. Espectro de difracción de rayos X en fibras de Coco Brasileñas	20
Figura 3. Tipos de hilo	22
Figura 4. Muestras pulverizadas y separadas por tipo de hilo	22
Figura 5. Molde 3D perforado	24
Figura 6. Molde de caucho con los hilos de fique crudo atravesados.....	25
Figura 7. Moldes de caucho con los hilos de fique recubiertos de OG y resina vertida.....	25
Figura 8. Probetas de resina con los hilos mercerizados luego del proceso de lijado	26
Figura 9. Micrografía de fique crudo (N1F7)	29
Figura 10. Micrografía original de fique mercerizado (M1F1)	30
Figura 11. Micrografías de fique mercerizado (M1F1)	30
Figura 12. Micrografía de fique mercerizado recubierto con OG (OG2F1).....	31
Figura 13. Diagrama de flujo del procesamiento de las micrografías	32
Figura 14. Interfaz de creación del polígono para la región de análisis	33
Figura 15. Espectro de difracción de rayos X del fique crudo.....	34
Figura 16. Espectro de difracción de rayos X del fique mercerizado	35
Figura 17. Diagrama de caja y bigotes de las áreas calculadas en los hilos crudos y mercerizados	38
Figura 18. Diagrama de caja y bigotes de las áreas aparentes calculadas en los hilos mercerizados recubiertos con OG	39

Figura 19. Micrografía de fique mercerizado (M3F11) con fibras recortadas por la escala empleada	40
Figura 20. Distribución de datos del número de filamentos en un hilo de fique del presente estudio	41
Figura 21. Distribución de datos del número de filamentos en un hilo de fique del estudio de Laverde	42
Figura 22. Distribución de datos del número de filamentos en un hilo de fique combinando los datos de este estudio y el de Laverde.....	42

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Cotización del servicio DRX emitida por el laboratorio de rayos X del PTG-UIS.	50
Apéndice B. Formato de remisión de muestras F-A-41 emitida por el Laboratorio de Rayos X del PTG-UIS	51
Apéndice C. Información de contacto de los laboratorios	52
Apéndice D. Cotización del servicio del MEB emitida por el Laboratorio de Nanotecnología de la UPB.....	52
Apéndice E. Micrografías del fique crudo antes y después del procesamiento de imágenes	53
Apéndice F. Micrografías del fique mercerizado antes y después del procesamiento de imágenes	54
Apéndice G. Micrografías del fique mercerizado y recubierto con OG antes y después del procesamiento de imágenes	55
Apéndice H. Código empleado para determinar las áreas	56
Apéndice I. Valores de área, número de filamentos, y diámetro aparente por filamento para todas las micrografías del fique crudo.....	57
Apéndice J. Valores de área, número de filamentos, y diámetro aparente por filamento para todas las micrografías del fique mercerizado	58
Apéndice K. Valores del área para todas las micrografías del hilo de fique mercerizado recubierto con óxido de grafeno.....	59

Glosario

Amorficidad: propiedad de un material que carece de una estructura cristalina definida, presentando una disposición aleatoria de sus átomos o moléculas.

Área transversal: la superficie de corte perpendicular a la longitud de un objeto, utilizada para describir la sección que queda expuesta cuando se corta el objeto transversalmente.

Cristalinidad: grado en que un material tiene una estructura cristalina, caracterizado por un ordenamiento regular y repetitivo de átomos o moléculas.

Difracción de rayos X: técnica utilizada para estudiar la estructura cristalina de materiales.

Hilos de fique: fibras naturales obtenidas de la planta de fique.

Índice de cristalinidad: medida de la proporción de material en un estado cristalino en comparación con su estado amorfo.

Microscopía electrónica de barrido: técnica que utiliza un haz de electrones para obtener imágenes de alta resolución de la superficie de muestras.

Probetas: muestras de material preparadas en formas y dimensiones específicas para ser sometidas a ensayos y pruebas en laboratorio.

Tasa de deformación: velocidad a la cual un material es deformado bajo una carga.

Tracción: proceso de aplicar una fuerza que estira un material en dirección longitudinal.

Resumen

Título: Desarrollo de actividades experimentales en el marco del proyecto VIE-3954 para determinar el índice de cristalinidad y el área de la sección transversal de hilos de fique crudos y tratados*

Autor: Nicolás David Díaz Zambrano**

Palabras Clave: Índice de cristalinidad, área de la sección transversal, hilos de fique, difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido, tratamiento manual de imágenes.

Descripción: En este documento se detalla el desarrollo de las actividades experimentales llevadas a cabo para determinar el índice de cristalinidad y el área de la sección transversal de hilos de fique crudos y tratados. Estas actividades se realizaron durante una pasantía de investigación en el grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME). Se prepararon probetas para ensayos de difracción de rayos X (DRX) con el fin de determinar el índice de cristalinidad en hilos de fique crudos y mercerizados. Estos ensayos se ejecutaron en el Laboratorio de Rayos X del Parque Tecnológico de Guatiguará de la UIS (PTG-UIS). Además, se prepararon probetas para ensayos de microscopía electrónica de barrido (MEB) con el fin de determinar el área de la sección transversal de cada tipo de hilo. Estos análisis se llevaron a cabo en el MEB del Laboratorio de Nanotecnología de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga (UPB). Los resultados de los ensayos DRX revelaron índices de cristalinidad relativamente bajos (13,57% y 26,82%) en comparación con otras fibras naturales, lo que sugiere un alto grado de amorficidad en las muestras analizadas. Sin embargo, se observó un aumento en la cristalinidad del hilo mercerizado, lo que indica que este tratamiento reestructura las moléculas de celulosa al interior de las fibras y elimina parte del material amorfo. Las áreas determinadas a partir de los ensayos MEB y el procesamiento de las micrografías evidencian que la sección transversal varía a lo largo del hilo, con valores promedio de 0,80 mm² para el fique crudo, 0,74 mm² para el mercerizado y 2,39 mm² para el mercerizado recubierto con óxido de grafeno. Se espera que los resultados de estas campañas experimentales proporcionen información relevante para caracterizar el comportamiento a tracción de las fibras de fique bajo diferentes tasas de deformación en futuras investigaciones.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: José Miguel Benjumea Royero. Ph.D. en Ingeniería Civil y Ambiental. Codirector 1: Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Ph.D. en Ingeniería Civil. Codirector 2: German Adolfo Díaz Ramírez. Ph.D. en Ingeniería de Materiales

Abstract

Title: Development of experimental activities within the framework of project VIE-3954 to determine the crystallinity index and cross-sectional area of raw and treated fique fibers*

Author: Nicolás David Díaz Zambrano**

Key Words: Crystallinity index, cross-sectional area, fique fibers, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, manual image processing.

Description: This document details the development of experimental activities conducted to determine the crystallinity index and cross-sectional area of untreated and treated fique yarns. These activities were carried out during a research internship with the Construction Materials and Structures Research Group (INME). Samples were prepared for X-ray diffraction (XRD) tests to determine the crystallinity index of raw and mercerized fique yarns. These tests were conducted in the X-ray Laboratory at the UIS Guatiguará Technology Park (PTG-UIS). Additionally, samples were prepared for scanning electron microscopy (SEM) tests to determine the cross-sectional area of each type of yarn. These analyses were performed at the SEM of the Nanotechnology Laboratory at Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga (UPB). The XRD test results revealed relatively low crystallinity indexes (13.57% and 26.82%) compared to other natural fibers, suggesting a high degree of amorphousness in the analyzed samples. However, an increase in the crystallinity of the mercerized yarn was observed, indicating that this treatment restructures the cellulose molecules within the fibers and removes some of the amorphous material. The areas determined from SEM tests and the processing of micrographs indicate that the cross-sectional area varies along the length of the yarn, with average values of 0.80 mm² for raw fique, 0.74 mm² for mercerized fique, and 2.39 mm² for mercerized fique coated with graphene oxide. These experimental campaigns' results are expected to provide relevant information for characterizing the tensile behavior of fique fibers under different strain rates in future studies.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Civil Engineering. Director: José Miguel Benjumea Royero. Ph.D. in Civil and Environmental Engineering
Co-director 1: Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Ph.D. in Civil Engineering. Co-director 2: Germán Adolfo Díaz Ramírez. Ph.D. in Materials Engineering

Introducción

La necesidad de adoptar nuevas prácticas sostenibles para la construcción y el reforzamiento de estructuras ha crecido en los últimos años. El uso extensivo de materiales tradicionales, en muchos casos no renovables, representa un problema a largo plazo debido a su impacto ambiental y al agotamiento de recursos asociados. Una estrategia prometedora para enfrentar esta problemática ha sido la incorporación de fibras naturales en la industria de la construcción. Estas fibras poseen la ventaja de ser una fuente sostenible, capaz de descomponerse de manera natural, son reciclables y más económicas en comparación con las fibras sintéticas comúnmente empleadas en compuestos (Perrier et al., 2015).

Las fibras de fique, obtenidas de las hojas de la planta homónima, son un claro ejemplo de este tipo de materiales. En Colombia, las fibras de fique se han empleado principalmente para producir telas, hilos, empaques y artesanías gracias a sus propiedades excepcionales (Peinado et al., 2006). Sin embargo, en los últimos años el interés en dichas fibras ha crecido debido a su potencial uso en ingeniería y como materia prima para la fabricación de productos con aplicaciones en diversas áreas, como materiales compuestos, bioaislantes, soportes de bioseparación, construcción e industria textil, entre otros (Hernandez et al., 2020; Muñoz-Blandón et al., 2023).

La caracterización integral de las fibras de fique resulta esencial para comprender a fondo su potencial como material de ingeniería. A pesar de la existencia de diversos estudios acerca de las propiedades mecánicas y estructurales de las fibras de fique (Bastidas et al., 2022; Delvasto et al., 2010; Diaz-Ramirez et al., 2019), hasta la fecha no se ha reportado una investigación metódica acerca de los efectos de la tasa de deformación sobre la respuesta en tracción de hilos de fique.

Teniendo en cuenta lo anterior, se presenta este trabajo de grado en apoyo al proyecto de investigación VIE-UIS No. 3954, con el objetivo de contribuir al conocimiento en este campo.

Para llevar a cabo este propósito, se realizaron ensayos de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido para caracterizar hilos de fique crudos y tratados. Los resultados obtenidos de estas campañas experimentales proporcionan una base sólida para la caracterización de su respuesta en tracción bajo diferentes tasas de deformación en estudios futuros, especialmente al determinar el nivel de cristalinidad de los hilos de fique crudos y tratados, y el área de la sección transversal. Además, la comparación de los resultados entre hilos crudos y tratados permitirá una mejor comprensión de las propiedades mecánicas y estructurales de las fibras de fique, allanando el camino para su aplicación eficiente en diversas áreas de la ingeniería y la construcción.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar actividades experimentales en el marco del proyecto VIE-UIS 3954 que permitan determinar el índice de cristalinidad y el área de la sección transversal de hilos de fique crudos y tratados.

1.2 Objetivos Específicos

Preparar las probetas para los ensayos de difracción de rayos X y microscopía, siguiendo procedimientos estandarizados para garantizar su correcta preparación.

Gestionar la ejecución de los ensayos de microscopía y difracción de rayos X con las probetas previamente preparadas.

Contribuir en el procesamiento de los datos obtenidos en las campañas experimentales y reportar los resultados de manera organizada.

2. Marco Teórico y Antecedentes

Para lograr un estudio y caracterización efectiva de las fibras e hilos de fique, es fundamental comprender qué es el fique, de dónde proviene y algunas de sus propiedades generales. Asimismo, resulta esencial explorar y emplear diversas técnicas que permitan su caracterización.

2.1 Fibras de Fique

El fique es una planta nativa de las regiones tropicales de América del sur y América central. Conocida científicamente como “*Furcraea*”, su cultivo se extiende particularmente en gran parte de las zonas andinas de Sudamérica. En Colombia, el fique se siembra con mayor énfasis en los departamentos del Cauca, Nariño, Antioquia, Guajira y Santander; estos cinco departamentos concentran el 99% de la producción total del país (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019). Además, el cultivo de fique tiene un papel social y económico importante en Colombia puesto que de este dependen unas 70.000 familias generalmente ubicadas en zonas marginales y en sitios donde la tierra no es muy productiva (Peinado et al., 2006).

Las fibras de fique obtenidas de las hojas de la planta tienen múltiples usos en Colombia gracias a sus propiedades destacadas: son biodegradables, flexibles, de bajo costo, baja densidad y excelentes propiedades térmicas y mecánicas en comparación con polímeros sintéticos (Peinado et al., 2006). La composición química básica de estas fibras, al igual que en las fibras vegetales en general consta de macromoléculas como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina; estas moléculas tienen un impacto significativo en la respuesta a tracción y el comportamiento mecánico de las fibras naturales (Madueke et al., 2023).

En estudios recientes, Laverde et al. (2022) estableció que, en las fibras de fique, el contenido de celulosa se encuentra en un rango entre el 53% y el 73%, la lignina entre el 7% y el 21%, y la hemicelulosa entre el 17% y el 26%. Por otro lado, un estudio sobre las fibras de fique provenientes de Antioquia determinó porcentajes específicos: 42.1% de celulosa, 13% de hemicelulosa y 18.2% de lignina (Bastidas et al., 2022). Los resultados obtenidos por estos estudios muestran una gran dispersión entre los datos. Lo anterior se debe a que las proporciones en la composición química de las fibras vegetales, así como sus propiedades mecánicas varían en función de la riqueza del suelo donde se siembra la planta, el método de cultivo y de extracción, la edad de la planta, la magnitud y el método de torsión que se le aplica a las fibras para crear el hilo, entre otros (Benjumea et al., 2022). Algunas de las propiedades generales de las fibras de fique extraídas de varios estudios [(Delvasto et al., 2010; Diaz-Ramirez et al., 2019; Laverde et al., 2022)] se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Propiedades generales de la fibra de fique

Propiedad	Valor
Densidad [g/cm ³]	0.7 – 1.4
Humedad [%]	8 – 12
Esfuerzo Último [MPa]	133 – 424
Módulo de Elasticidad [GPa]	5.7 – 24
Deformación Unitaria Última [%]	4 – 9.8
Hemicelulosa [%]	17 – 26
Lignina [%]	10 – 21

Celulosa [%]	53 – 70
<u>Diámetro Equivalente [μm]</u>	<u>78 – 96</u>

2.2 Microscopía Electrónica de Barrido y sus Aplicaciones en la Caracterización de las Fibras de Fique

La microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés: Scanning Electron Microscopy) constituye una técnica avanzada en el campo de la microscopía. Esta técnica emplea haces de electrones en lugar de luz visible para lograr la visualización de muestras a una escala microscópica, permitiendo la obtención de imágenes de alta resolución de la superficie de diversos materiales. El proceso desarrollado por el haz de electrones permite un examen detallado de la morfología y estructura de la superficie de la muestra, ofreciendo información valiosa sobre sus características a escala microscópica.

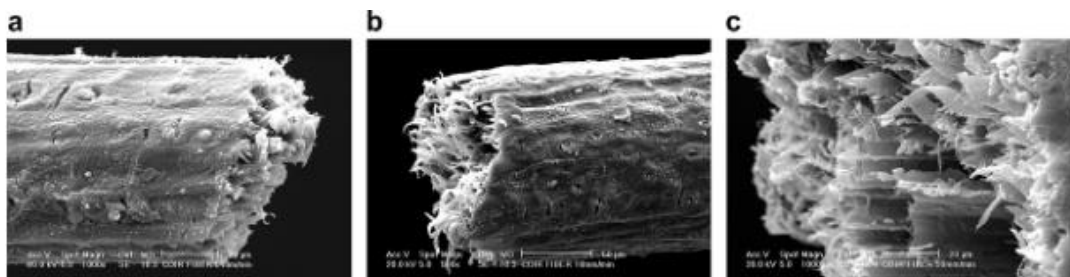
En el ámbito de la caracterización de las fibras de fique, la microscopía electrónica de barrido presenta múltiples aplicaciones que contribuyen al desarrollo del estudio de estas fibras. Por ejemplo, Laverde (2023) empleó en su estudio la técnica SEM para caracterizar la morfología de las fibras de mallas de fique. Mediante esta técnica, obtuvo micrografías detalladas de diferentes secciones transversales y de la superficie longitudinal de las fibras de fique. Posteriormente utilizó un algoritmo desarrollado en Matlab que le permitió transformar estas micrografías en imágenes binarias con el área de las fibras delimitada y así, determinar el número de píxeles que conformaban el área de las fibras analizadas. Esto, posibilitó el cálculo del área transversal de dichas fibras. Este procedimiento resulta altamente beneficioso en el contexto del presente estudio, ya que posibilita la caracterización precisa del área de la sección transversal de las fibras e hilos

de fique. A partir de esta medida, se vuelve factible el cálculo del esfuerzo al que están sometidos los hilos, lo que permite generar las curvas de esfuerzo-deformación correspondientes.

Asimismo, la SEM puede emplearse para analizar la morfología de fractura de las fibras de fique tras ser sometidas a distintas tasas de deformación (ϵ), examinando la superficie de las fibras fracturadas luego de realizar los respectivos ensayos de tracción. En el estudio de Tomczak et al. (2007), se sometieron fibras de coco brasileñas a diferentes tasas de deformación hasta generar su fractura en tracción. Posteriormente, se realizó un análisis SEM de la sección transversal y las superficies de fractura bajo tensión (Fig. 1). Los resultados obtenidos revelaron similitudes en las superficies evaluadas a diversas tasas de deformación, sugiriendo que la velocidad de deformación no tenía efectos sobre la morfología de fractura de las fibras de coco en Brasil.

Figura 1

Microscopía en fibras de coco fracturadas bajo diferentes tasas de deformación



Nota. Tomado de (Tomczak, Sydenstricker, et al., 2007).

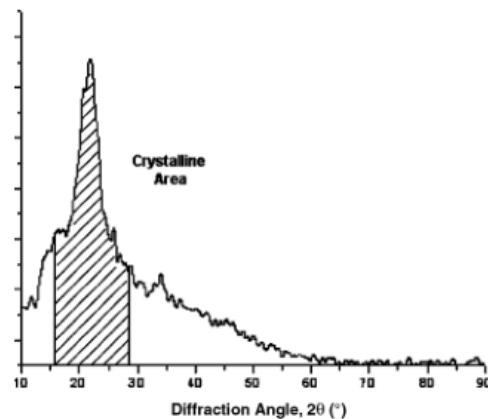
2.3 Difracción de Rayos X y su Aplicación en la Caracterización de Fibras de Fique

La difracción de rayos X es una técnica de análisis que pertenece al campo de la caracterización de materiales. Esta técnica se utiliza para estudiar la estructura cristalina de los materiales basándose en la interacción de los rayos x con la materia. En el caso de las fibras vegetales, estas se componen principalmente de celulosa, lignina y hemicelulosa. La celulosa es el

componente principal que exhibe estructuras cristalinas bien definidas. Investigaciones previas, como las realizadas por Tomczak, Satyanarayana, et al. (2007) y Tomczak, Sydenstricker, et al. (2007), emplearon la difracción de rayos X para determinar el porcentaje de cristalinidad en fibras lignocelulósicas brasileñas. A partir de espectros de difracción de rayos X (Fig. 2), calcularon que el índice de cristalinidad para las fibras de coco y curauá brasileñas era del 57% y 66.3%, respectivamente. Partiendo de estos estudios, resultaría muy útil emplear la difracción de rayos X para caracterizar la región cristalina de las fibras de fique seleccionadas.

Figura 2

Espectro de difracción de rayos X en fibras de Coco Brasileñas



Nota. Tomado de (Tomczak, Sydenstricker, et al., 2007).

3. Preparación de probetas para los ensayos de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido

La preparación de las probetas se dividió en dos partes, considerando que se debían llevar a cabo dos ensayos diferentes, cada uno con su propio conjunto de probetas. Además, se debe tener en cuenta que cada ensayo debía realizarse para tres tipos de hilo: fique crudo (sin tratar), fique mercerizado (tratado mediante inmersión en solución de NaOH) y fique mercerizado recubierto con óxido de grafeno (OG).

3.1 Probetas para ensayos DRX

Para la preparación de las probetas, primero se adquirió la materia prima. El hilo de fique natural, con una densidad lineal $Nm = 1050 \text{ m/kg}$ (equivalente a 952.38 Tex), se obtuvo de la empresa Coohilados del Fonce Ltda, ubicada en el municipio de San Gil, Santander. Este hilo se utilizó tanto para los tratamientos como para todos los ensayos. Los hilos mercerizados y con recubrimiento de óxido de grafeno fueron proporcionados por otros estudiantes (Carlos Alberto Sandoval, Silvia Nathalia Díaz) de ingeniería civil que hacen parte del equipo de investigación del proyecto VIE-UIS 3954 y quienes tenían la tarea de realizar los tratamientos respectivos.

Una vez obtenida la materia prima, se procedió a recortar muestras aleatorias de cada tipo de hilo (Fig. 3) con tijeras hasta pulverizar las fibras. Para eliminar posibles impurezas y partículas de mayor tamaño, el polvo resultante se pasó a través de un tamiz N°18 (1 mm). Las muestras de fique crudo y fique mercerizado obtenidas de este tamizado pesaron seis gramos (6 gr) cada una,

cumpliendo así con las condiciones mínimas de un gramo (1 gr) establecidas por el Laboratorio de Rayos X del PTG-UIS. Cada muestra se separó y etiquetó en una bolsa resellable (Fig. 4).

Figura 3

Tipos de hilo



Nota. (a) hilo de fique crudo, (b) hilo de fique mercerizado y (c) hilo de fique mercerizado recubierto con OG.

Figura 4

Muestras pulverizadas y separadas por tipo de hilo



Nota. (a) fique crudo, (b) fique mercerizado y (c) fique mercerizado recubierto con OG.

En el caso de la muestra de hilo recubierto con óxido de grafeno, no fue posible pulverizar las partículas usando tijeras debido al endurecimiento del hilo como consecuencia del tratamiento. Tampoco se lograron resultados satisfactorios con el uso de licuadoras o procesadores de alimentos. Finalmente, se intentó reducir el tamaño de las partículas aplanándolas mediante una prensa en el Laboratorio de Rayos X, pero este procedimiento también resultó infructuoso. En la Figura 1-c se observa el polvo resultante de todos estos procedimientos, en el que se evidencia que el tamaño de partículas es considerablemente mayor al de las otras muestras. Por lo tanto, no fue posible realizar el ensayo sobre las muestras del hilo recubierto con OG.

Cabe resaltar que la pulverización de las fibras es esencial para llevar a cabo el ensayo DRX correctamente. Las partículas más pequeñas aseguran una homogeneidad de la muestra, lo que es crucial para obtener datos representativos y precisos. Además, la interacción con los rayos X se optimiza, ya que las partículas más pequeñas tienen una mayor superficie expuesta, mejorando la calidad del patrón de difracción. Por último, las partículas grandes pueden introducir artefactos y efectos de tamaño que distorsionan los picos de difracción, complicando la interpretación de los datos.

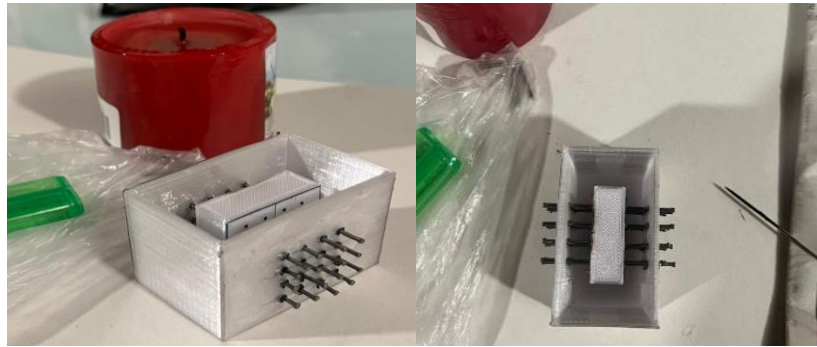
3.2 Probetas para las microscopías del área de los hilos

Inicialmente, se realizó la impresión 3D de un molde en forma de caja, con un prisma rectangular en el centro que simulaba el tamaño de las probetas que se querían obtener. Luego, este molde se perforó con un total de dieciséis puntillas de hierro en cada lado, verificando que las perforaciones fueran simétricas y encajaran perpendicularmente en el prisma central (Fig. 5). La función de estas puntillas era formar los huecos por los cuales se atravesarían los hilos. A partir de este molde se generó un contramolde hecho de caucho de silicona. Para esto se aplicó silicona

caliente alrededor de las puntillas, evitando posibles filtraciones de la mezcla que posteriormente se iba a verter. Luego, se mezcló el caucho de silicona con un catalizador, ambos adquiridos en la empresa Ingequímicas de Bucaramanga, y se vertió la mezcla en el molde 3D. Una vez seca la mezcla, se retiraron las puntillas y se desmoldó el caucho. Este procedimiento de mezcla y vertido se realizó tres veces, volviendo a colocar y quitar las puntillas, de modo que se elaboraron un total de tres moldes de caucho.

Figura 5

Molde 3D perforado



A partir de los moldes de caucho, se inició la elaboración de las probetas de resina. Con ayuda de una aguja, se atravesaron segmentos de los hilos de fique por cada orificio del molde. Luego, estos segmentos fueron recortados, tensados manualmente y rodeados de silicona caliente en la parte exterior del caucho para mantenerlos fijos (Fig. 6). Posteriormente, se preparó una mezcla de resina con catalizador, calentándola a 60 °C para eliminar la mayor cantidad de burbujas posible, y se vertió en el caucho con los hilos (Fig. 7). Finalmente, se dejó secar la mezcla durante 24 horas y se desmoldó con ayuda de un bisturí. Este procedimiento de mezcla y vertido se realizó tres veces, una por cada tipo de hilo, obteniendo nueve probetas de resina (tres por cada tipo de hilo).

Figura 6

Molde de caucho con los hilos de fique crudo atravesados

**Figura 7**

Moldes de caucho con los hilos de fique recubiertos de OG y resina vertida



Una vez elaboradas las probetas de resina, se procedió a lijarlas y pulirlas para asegurar que el microscopio electrónico de barrido pudiese capturar imágenes de alta calidad de las fibras. Para el lijado, se utilizaron lijas de agua con granos 220, 400, 600 y 1200, hasta que las caras de las probetas quedaron planas y lisas (Fig. 8). Posteriormente, cada probeta se pulió en una sola cara (la cual sería capturada por el MEB) usando la máquina pulidora del Laboratorio de

Metalografía de la escuela de metalúrgica en la UIS. Las nueve probetas se pulieron, se separaron y se etiquetaron según el tipo de hilo en bolsas resellables, cubriéndolas con algodón para evitar marcas en la cara pulida.

Figura 8

Probetas de resina con los hilos mercerizados luego del proceso de lijado



4. Gestión de la ejecución de los ensayos

4.1 Gestión de los ensayos DRX

Inicialmente, se realizó una visita al Laboratorio de Rayos X del PTG-UIS para consultar los requisitos específicos de entrega de las muestras. Durante esta visita, se discutieron los procedimientos adecuados para la preparación de las muestras y los parámetros experimentales necesarios. Posteriormente, se envió una solicitud formal de cotización a través de correo electrónico, detallando las necesidades específicas del ensayo, así como el tipo y número de muestras a analizar. Este correo fue respondido con una solicitud de información adicional sobre el proyecto, incluyendo el nombre del grupo de investigación, el director del proyecto, y algunos

datos de contacto. Luego de enviar la información, el laboratorio proporcionó una cotización formal (Apéndice A), la cual fue revisada y aceptada por parte del grupo de investigación. Para completar el proceso, el director del proyecto VIE-UIS 3954, profesor José Miguel Benjumea gestionó el traslado de fondos a una cuenta de cobro proporcionada por el laboratorio.

Finalmente, se completó el formato de remisión de muestras para clientes internos expedido por el laboratorio, el cual detallaba información del proyecto, las muestras y los objetivos del ensayo (Apéndice B). Una vez diligenciado, el formato se envió por correo electrónico al laboratorio y las muestras se entregaron personalmente, cumpliendo con todos los requisitos establecidos, a excepción de la muestra de fique recubierto con OG, la cual no pudo ensayarse debido a la imposibilidad de pulverizar el hilo. Los resultados cualitativos fueron enviados una semana después de la entrega de las muestras, seguidos de los resultados cuantitativos con las respectivas gráficas una semana más tarde. La información de contacto y dirección del laboratorio se detalla en el Apéndice C.

4.2 Gestión de las micrografías

La gestión de la toma de micrografías se realizó en el Laboratorio de Nanotecnología de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, debido a que el MEB del Laboratorio de Microscopía del PTG-UIS estaba en reparación. Inicialmente, se contactó telefónicamente al técnico encargado del laboratorio, Víctor Hugo Cuellar. Por este medio, se agendó una cita para entregar las probetas preparadas y discutir las condiciones para llevar a cabo el ensayo. Durante la visita, se acordó tomar 16 micrografías por cada probeta de resina resultando en un total de 144 micrografías para los tres tipos de hilo (48 por cada tipo de hilo). Además, se decidió que todas las micrografías se tomarían con la misma escala (600 μm), lo que facilitaba tanto la toma de imágenes

como la posterior determinación de las áreas mediante el procesamiento de imágenes. Posteriormente, se hizo la contratación formal del servicio del MEB con un costo reducido, dado que formaba parte de un trabajo de investigación. Esta reducción se logró al comprometerse el proyecto a incluir los agradecimientos correspondientes al técnico y al laboratorio en todas las publicaciones derivadas de los resultados. La cotización del servicio y la reducción con la condición de cliente interno de la UPB se muestran en el Apéndice D.

Los resultados para las probetas de fique crudo y fique mercerizado se recibieron una semana después de realizar el traslado de fondos. Sin embargo, los resultados para las probetas de fique recubierto con OG se recibieron hasta dos meses después debido a una avería en el computador que operaba el MEB. Ante este imprevisto, el técnico gestionó la toma de las micrografías faltantes en el MEB de la UPB sede Medellín. El traslado de las probetas y la ejecución de los ensayos en esta sede fueron las causas de dicha demora.

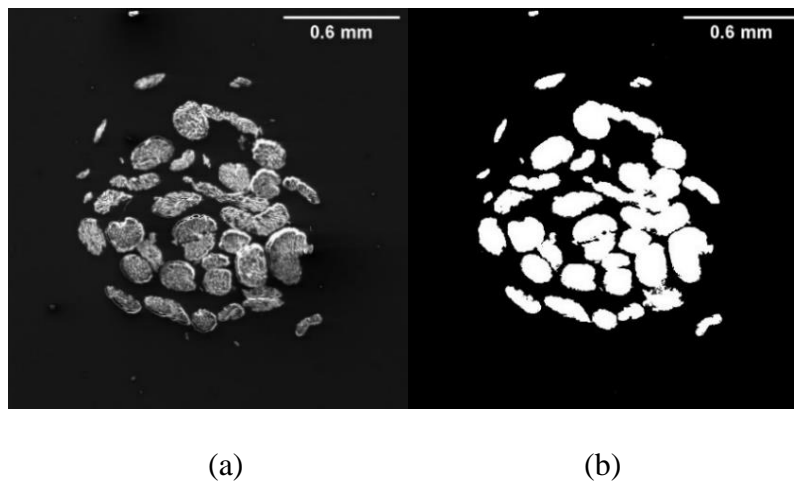
5. Procesamiento de las micrografías y código empleado para la determinación de las áreas

Una vez obtenidas las micrografías, fue necesario realizarles un tratamiento de imagen para permitir una determinación más precisa de las áreas. Para ello, se empleó el software de procesamiento y análisis de imágenes Fiji (ImageJ) (Fiji, s.f). A través de este software, se logró la binarización de las imágenes digitales, transformando las diferentes escalas de grises presentes en las micrografías originales en imágenes de solo dos tonalidades: negro y blanco (Fig. 9). De este modo, las fibras presentes en cada micrografía resaltaban en color blanco, mientras que todo lo demás, incluyendo el fondo, las burbujas presentes en la resina o cualquier impureza que no

formara parte de las fibras, permanecía en color negro. En el caso de las micrografías de las probetas de fique crudo, esto se logró empleando únicamente la herramienta "Make binary" del software, transformando automáticamente estas imágenes gracias a su alta calidad, que permitía diferenciar claramente entre las fibras y el fondo.

Figura 9

Micrografía de fique crudo (NIF7)



Nota. (a) micrografía original y (b) micrografía binarizada.

Por otro lado, las micrografías de las probetas de fique mercerizado presentaron una menor calidad, lo que dificultó la diferenciación entre las fibras y el fondo (Fig. 10). Por ello, se requirió de un procesamiento manual más exhaustivo, ya que al binarizar las imágenes, algunas partes del fondo también se volvían blancas, lo cual era indeseable para la cuantificación del área. Para solucionar esto, se ajustó el contraste de cada una de las imágenes, se empleó nuevamente la herramienta "Make binary" y, por último, con ayuda de herramientas de dibujo del programa se eliminaron manualmente las áreas blancas que no hacían parte de las fibras. La Figura 11 muestra

la diferencia entre la micrografía binarizada sin edición y la micrografía resultante luego de binarizar y editar con herramientas de dibujo.

Figura 10

Micrografía original de fique mercerizado (MIF1)

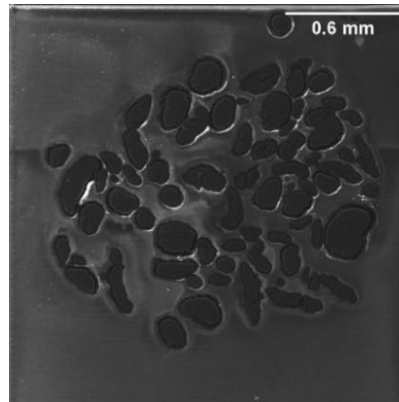
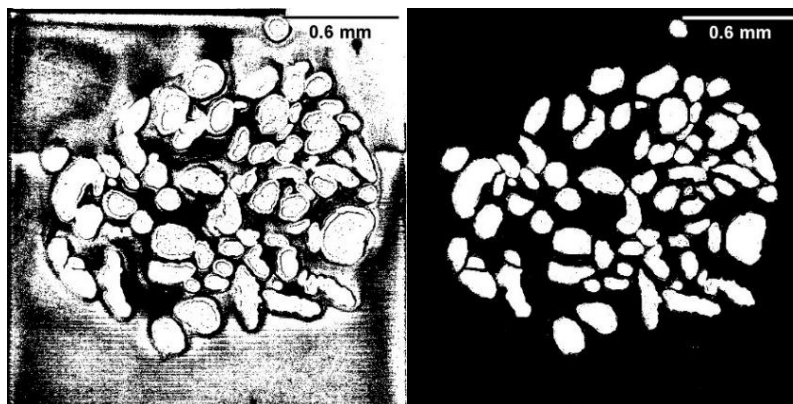


Figura 11

Micrografías de fique mercerizado (MIF1)



(a)

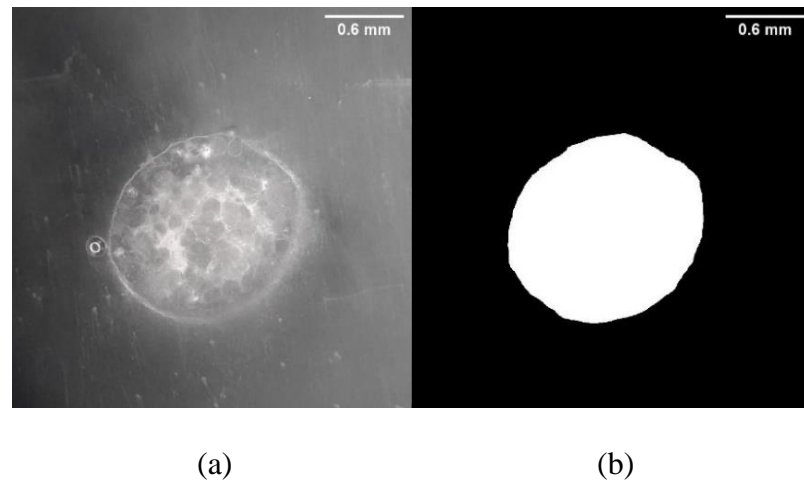
(b)

Nota. (a) micrografía binarizada sin edición y (b) micrografía binarizada y editada con herramientas de dibujo.

Las micrografías de las probetas de fique mercerizado recubierto con OG, que fueron analizadas en el MEB de la UPB sede Medellín, también presentaron baja calidad. Además, el recubrimiento de óxido de grafeno se mezcló con las fibras, dificultando en gran medida la diferenciación de estas dentro del recubrimiento. Por lo tanto, se contorneó manualmente cada segmento de hilo con la ayuda de las herramientas de dibujo y se resaltó en blanco todo lo que se encontraba dentro del contorno (Fig. 12).

Figura 12

Micrografía de fique mercerizado recubierto con OG (OG2F1)



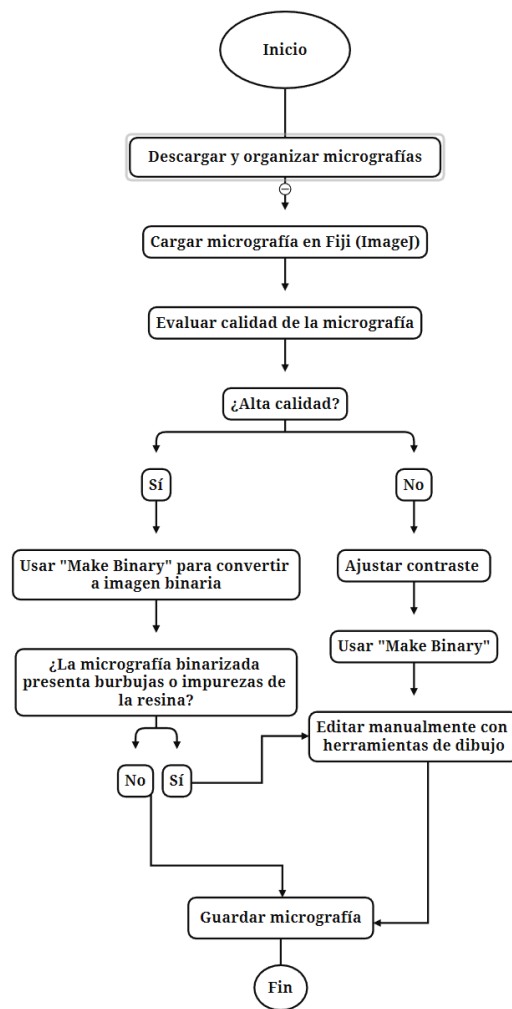
Nota. (a) micrografía original y (b) micrografía binarizada.

La Figura 13 resume en términos generales el procesamiento de micrografías descrito anteriormente. Cabe resaltar que la edición manual con herramientas de dibujo se realizó sobre todas las micrografías de las probetas del fique mercerizado y fique mercerizado recubierto con óxido de grafeno. En los Apéndices E, F y G se presentan diversas micrografías antes y después

del procesamiento de imágenes para cada tipo de hilo. Las imágenes obtenidas de este procesamiento fueron las empleadas para la determinación de áreas.

Figura 13

Diagrama de flujo del procesamiento de las micrografías



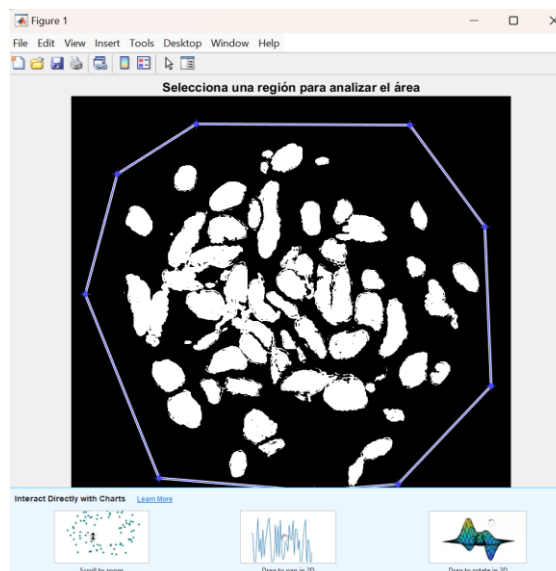
Para determinar las magnitudes de las áreas de la sección transversal en los hilos de fique crudos y tratados, se implementó un código desarrollado en el software Matlab (The MathWorks, 2024). Este código fue suministrado por los estudiantes de ingeniería civil Tania Yuliana Álvarez Rincón y Jhoan Camilo Castellanos Díaz, quienes hacían parte del proyecto VIE-UIS 3954 y

desarrollaron la programación para calcular el área de la sección transversal de hilos de piña a partir de micrografías (Apéndice H).

El funcionamiento de este código se basa en un algoritmo que binariza las micrografías en función de un umbral establecido manualmente, basado en el histograma de la escala de grises de cada imagen. Luego, todos los tonos de la escala de grises que se encuentren por debajo del umbral de corte establecido se convierten en blanco. Dado que las micrografías obtenidas del procesamiento de las imágenes de este trabajo de grado ya estaban binarizadas, el valor de umbral establecido en todas las imágenes fue de cero (0). Posteriormente, se proporciona al algoritmo una longitud real y su equivalente en píxeles utilizando la escala de las imágenes, y se ejecuta el código. Finalmente, emerge una interfaz en la cual se debe crear manualmente un polígono para seleccionar la región de análisis en cada imagen (Fig. 14). Una vez seleccionada la región de análisis, el algoritmo calcula el área blanca en píxeles y la convierte a mm^2 a partir de la escala proporcionada.

Figura 14

Interfaz de creación del polígono para la región de análisis



6. Resultados

6.1 Espectro de difracción de rayos X e índice de cristalinidad (IC)

Los espectros de difracción de rayos X obtenidos para la muestra de fique crudo y la muestra de fique mercerizado se muestran en las Figuras 15 y 16, respectivamente. El patrón de las gráficas es similar al observado en otras fibras naturales (Madhu et al., 2020; Sreenivasan et al., 2011). Ambas gráficas muestran dos picos distintos, situados cerca de $2\theta = 16^\circ$ y $2\theta = 22^\circ$, respectivamente. Esto se debe a que, en términos generales, las fibras de plantas naturales presentan dos picos característicos cerca de estos valores de 2θ , correspondientes a los picos de celulosa tipo I y tipo IV (Zhou et al., 2024).

Figura 15

Espectro de difracción de rayos X del fique crudo

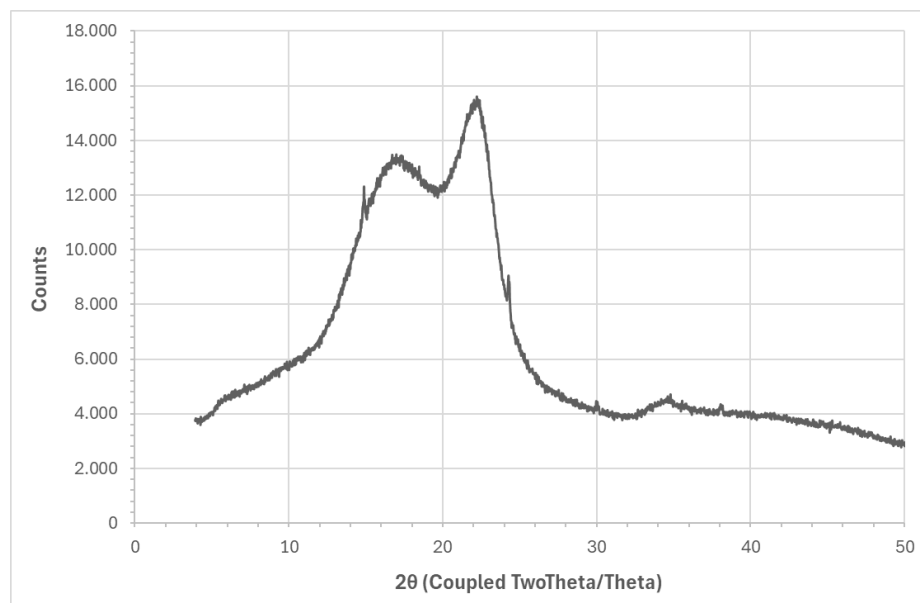
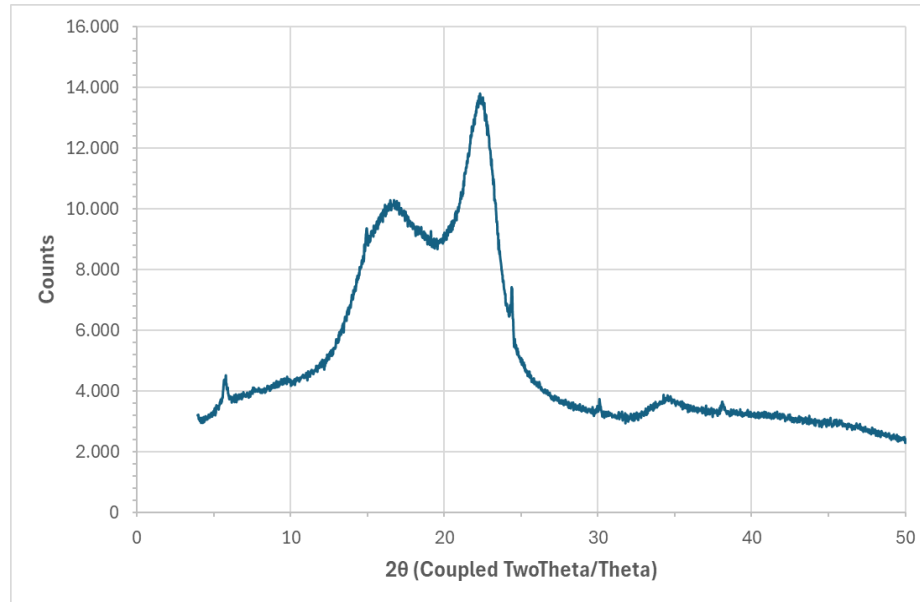


Figura 16*Espectro de difracción de rayos X del fique mercerizado*

El índice de cristalinidad de las muestras se determinó siguiendo el método empírico propuesto por Segal et al. (s.f), empleando la ecuación (1).

$$IC (\%) = \frac{(I_{002} - I_{am})}{I_{002}} \times 100 \quad (1)$$

En la ecuación (1), I_{002} corresponde a la intensidad máxima del pico de difracción, relacionada con la parte cristalina de la celulosa en el plano 002, e I_{am} se refiere a la intensidad de la dispersión del fondo (parte amorfa de la muestra). Los índices de cristalinidad calculados para cada tipo de hilo se muestran en la Tabla 2.

A pesar de que los resultados indican que ambas muestras presentan un alto grado de amorficidad, expresando índices de cristalinidad bajos en comparación con otras fibras naturales (Tomczak, Satyanarayana, et al., 2007; Tomczak, Sydenstricker, et al., 2007), se observa un aumento considerable en el IC del hilo tratado con NaOH. Esto corrobora los resultados obtenidos

para fibras como el yute y la piassava en Brasil, donde el índice de cristalinidad también aumentó luego de la mercerización (Tabla 3). Este aumento se debe a que el tratamiento con NaOH elimina parte del material amorfo de las fibras, causando una reestructuración de las moléculas de celulosa dentro de la fibra. Por lo tanto, las fibras tratadas tendrán una mejor interacción con matrices como el cemento (Da Fonseca et al., 2021), en caso de que estas se quieran usar como refuerzo en construcción.

Tabla 2

Intensidades relativas e índices de cristalinidad en fibras de fique crudas y mercerizadas

Muestra	I002	2θ (002)	I _{am}	2θ (am)	IC (%)
Fique Crudo	15603	22,22°	13.485	17°	13,57
Fique Mercerizado	13788	22,31°	10.090	16,78°	26,82

Tabla 3

Intensidades relativas e índices de cristalinidad en fibras naturales brasileñas crudas y mercerizadas

Fibra	Tratamiento	I002	2θ (002)	I _{am}	2θ (am)	IC (%)
Piassava	Crudo	1180	22,42°	710	15,98°	39,83
	Mercerizado	1469	22,18°	737	15,98°	49,83
Yute	Crudo	761	22,60°	386	15,86°	49,28
	Mercerizado	3138	22,58°	1333	15,88°	57,53

Nota. Adaptado de (Da Fonseca et al., 2021).

6.2 Áreas calculadas

Se calcularon los valores del área de la sección transversal para cada tipo de hilo utilizando el procedimiento descrito en la metodología. Vale la pena recordar que en el caso del fique mercerizado recubierto con OG, se determinó un área aparente, dada la dificultad para diferenciar, en las micrografías, las fibras del recubrimiento de OG.

A partir de los valores máximos y mínimos de las áreas calculadas, se determinó un rango de diámetros aparentes para cada tipo de hilo, asumiendo formas de sección transversal circulares y diámetros constantes. Además, se realizó un conteo manual del número de filamentos presentes en cada micrografía para los hilos de fique crudos y mercerizados. Mediante análisis estadístico, se determinó el número promedio de filamentos presentes en estos hilos, así como el área promedio de cada filamento y su correspondiente diámetro aparente.

6.2.1 Áreas y diámetros aparentes de los hilos

Las Figuras 17 y 18 presentan la distribución de las áreas calculadas para cada tipo de hilo a partir de las micrografías tratadas. Las áreas promedio determinadas fueron: 0,80 mm² para el fique crudo, 0,74 mm² para el mercerizado y 2,39 mm² para el hilo mercerizado y recubierto con OG.

Se observa una reducción en el área de los hilos luego del tratamiento de mercerización. Según otros estudios sobre alcalinización en fibras naturales, este efecto se debe a la reorganización y alineación uniforme de las moléculas de celulosa durante el mercerizado, lo cual se asocia también con el aumento en la cristalinidad. Esta reestructuración permite que las fibras individuales se acomoden más estrechamente, reduciendo el volumen total ocupado por ellas y, en consecuencia, el área de la sección transversal. Además, el proceso alcalino elimina impurezas y

componentes no celulósicos de las fibras, como lignina, hemicelulosa y ceras naturales, lo que contribuye a una estructura de fibra más compacta y a una menor sección transversal (Laverde Sarmiento et al., 2023; Mina, 2012; Muñoz-Velez et al., 2014).

El aumento significativo en el área de los hilos mercerizados y recubiertos con OG debe ser analizado con cuidado, puesto que el aumento se atribuye al área aparente calculada, que incluye todo el interior del recubrimiento. Dicha área aparente no refleja la contribución real de las fibras al comportamiento mecánico, ya que no todo el interior del recubrimiento aporta resistencia al material. Por lo tanto, para efectos de caracterizar este hilo a tracción, se recomienda utilizar el área del fique mercerizado, dado que las fibras mercerizadas son las que mayormente contribuyen a la resistencia del hilo recubierto con óxido de grafeno.

Figura 17

Diagrama de caja y bigotes de las áreas calculadas en los hilos crudos y mercerizados

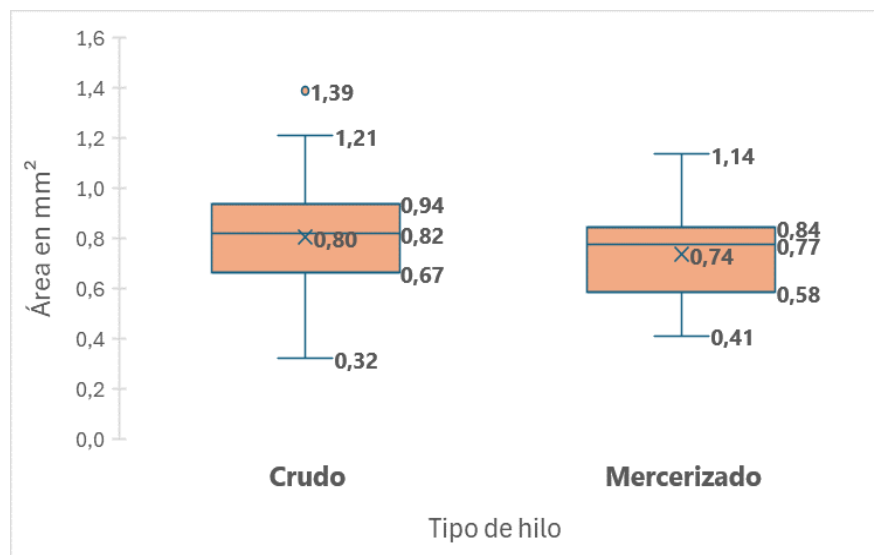
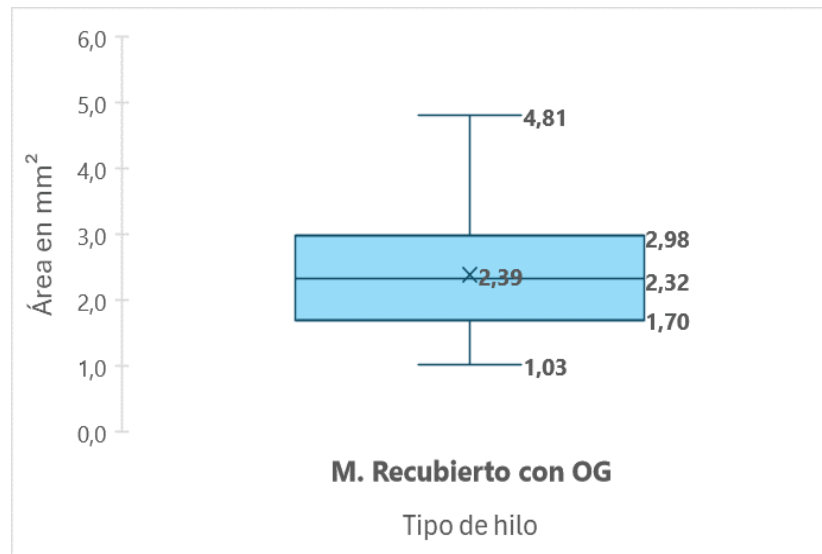


Figura 18

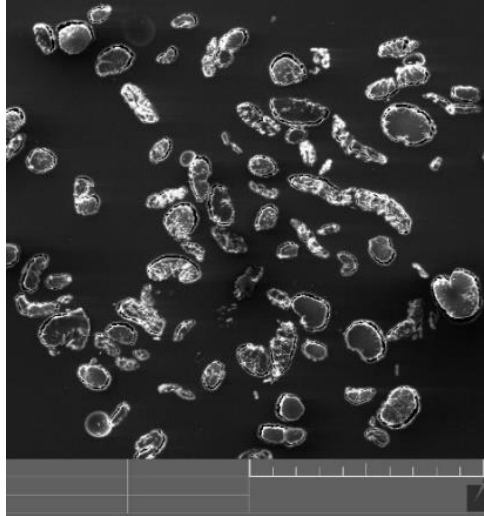
Diagrama de caja y bigotes de las áreas aparentes calculadas en los hilos mercerizados recubiertos con OG



Es importante destacar que, dado que todas las micrografías se tomaron con el mismo aumento y escala, se recortó una pequeña parte de algunos filamentos en los segmentos de hilo más dispersos (Fig. 19). Específicamente, el 23,6% de las micrografías presentaron fibras recortadas, lo que puede hacer que el valor de las áreas promedio calculadas sea ligeramente inferior al valor real. Además, la precisión de los resultados para las áreas del hilo mercerizado también depende de la exactitud en el uso de las herramientas de dibujo del software Fiji durante el procesamiento de imágenes.

Figura 19

Micrografía de fique mercerizado (M3F11) con fibras recortadas por la escala empleada



Por otro lado, los diámetros aparentes de cada tipo de hilo se calcularon utilizando la ecuación (2), donde \varnothing_a es el diámetro aparente y A_i representa las áreas mínimas, máximas y promedio de cada tipo de hilo.

$$\varnothing_a = 2 * \sqrt{\frac{A_i}{\pi}} \quad (2)$$

Los resultados muestran que el diámetro aparente del hilo de fique crudo oscila entre 0.64 mm y 1.33 mm (con un promedio de 1.01 mm), para el mercerizado entre 0.72 mm y 1.20 mm (con un promedio de 0.97 mm), y para el mercerizado con recubrimiento de OG entre 1,14 mm y 2,48 mm (con un promedio de 1,74 mm).

6.2.2 Áreas y diámetros aparentes de los filamentos

Puesto que en la literatura generalmente se reportan las áreas y los diámetros aparentes de los filamentos (o fibras), resulta importante cuantificar dichos valores a partir de las áreas

calculadas de los hilos y el número de filamentos por hilo. Este cálculo se realizó únicamente para los hilos mercerizados y crudos, teniendo en cuenta el inconveniente discutido para las fibras mercerizadas y recubiertas con OG. Para calcular el área y el diámetro aparente de los filamentos, se realizó un conteo manual del número de filamentos presentes en cada micrografía. Partiendo de la idea de que el tratamiento del hilo no debería influir en el número de filamentos presentes en este, se combinaron ambas muestras y se realizó un análisis estadístico general. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 20. Estos resultados se compararon con los obtenidos por Laverde Sarmiento et al., (2023) en un estudio donde se contó el número de filamentos de una muestra de 355 hilos de fique de densidad lineal $N_m = 1050$ m/kg provenientes de Coohilados del Fonce Ltda. (Fig. 21).

Figura 20

Distribución de datos del número de filamentos en un hilo de fique del presente estudio

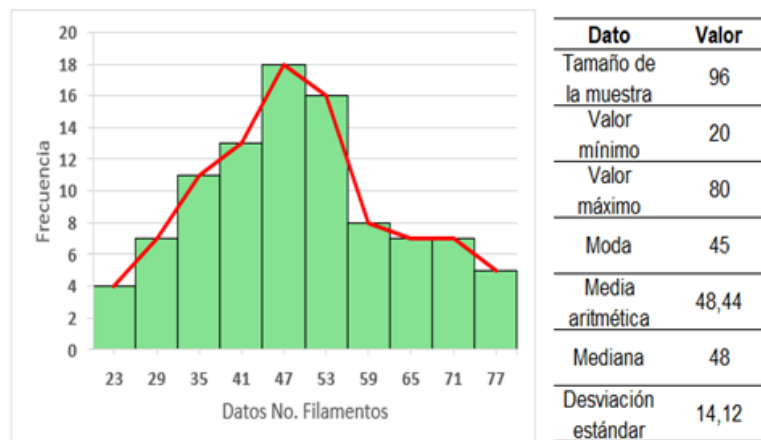
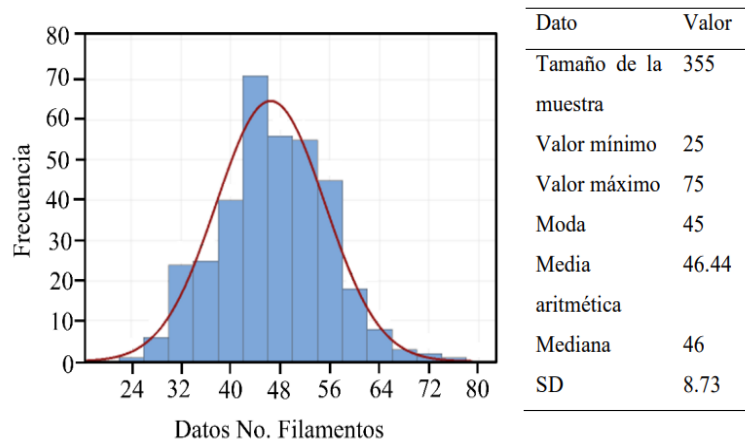


Figura 21

Distribución de datos del número de filamentos en un hilo de fique del estudio de Laverde

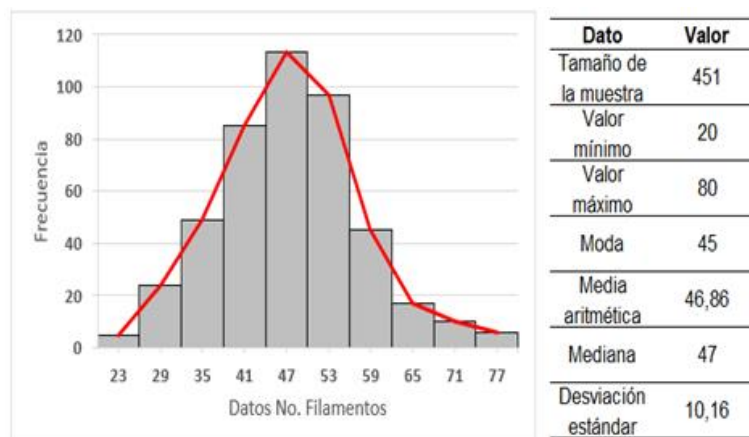


Nota. Tomado de (Laverde Sarmiento et al., 2023)

Considerando que en el estudio de Laverde et al., (2023) se analizó hilo de fique con la misma densidad lineal y proveniencia que en el presente estudio, se combinaron los datos de ambos estudios y se realizó el análisis estadístico sobre el total de las muestras (451), cuyos resultados se presentan en la Figura 22.

Figura 22

Distribución de datos del número de filamentos en un hilo de fique combinando los datos de este estudio y el de Laverde



Como se observa en la Figura 22, el promedio de filamentos presentes en un hilo de fique a partir de los estudios combinados fue de 46,86. Este valor se redondeó a 47 y se empleó para calcular el área y el diámetro aparente de cada filamento. Para el área, se dividió el área promedio de cada tipo de hilo entre el número promedio de filamentos, y luego se usó la ecuación (2) para determinar el diámetro aparente de cada filamento. Los resultados para ambos tipos de hilo se muestran en la Tabla 4. Los valores del diámetro aparente se sitúan ligeramente por debajo del rango típico observado en otros estudios sobre fibras de fique, el cual oscila entre los 160 μm y 420 μm (Delvasto et al., 2010; Mina, 2012; Muñoz-Velez et al., 2014). Sin embargo, considerando el recorte de fibras ya mencionado, que resulta en un valor promedio de áreas inferior al real, se puede afirmar que los resultados obtenidos son coherentes. En los Apéndices I, J y K se presentan los valores de área, número de filamentos, y diámetro aparente por filamento para todas las micrografías según el tipo de hilo.

Tabla 4

Áreas y diámetros aparentes de cada filamento según el tipo de hilo

Tipo de hilo	Área Promedio del hilo (mm^2)	No. Promedio de filamentos	Área promedio de cada filamento (mm^2)	Diámetro aparente de cada filamento (μm)
Crudo	0,80	47	0,0171	147,6
Mercerizado	0,74	47	0,0157	141,2

7. Conclusiones

El presente estudio se centró en contribuir a la caracterización física y estructural de hilos de fique crudos y tratados, con el objetivo de facilitar futuros análisis de su respuesta mecánica a tracción bajo distintas tasas de deformación, proporcionando así una visión más completa de su potencial en aplicaciones de ingeniería y construcción. Las principales conclusiones a partir de los resultados obtenidos son:

Las probetas fueron preparadas exitosamente para los ensayos de DRX y MEB, siguiendo los procedimientos sugeridos por cada laboratorio. A través de una comunicación efectiva y una planificación detallada, se logró gestionar exitosamente la ejecución de los ensayos. Excepto la muestra de fique mercerizado recubierto con OG, que no pudo ser analizada por DRX, todas las probetas cumplieron con los requisitos establecidos. La diligente gestión de la ejecución de los ensayos y la aplicación rigurosa de los procedimientos sugeridos por los laboratorios garantizó la obtención de resultados fiables y reproducibles, cumpliendo con los objetivos del proyecto de investigación.

Los ensayos de difracción de rayos X revelaron un índice de cristalinidad del 13,57% para el hilo de fique crudo, lo que representa un alto grado de amorficidad en comparación con otras fibras naturales. Sin embargo, el tratamiento con NaOH incrementó significativamente este índice, corroborando que el mercerizado elimina parte del material amorfo y permite la reestructuración de las moléculas de celulosa, como sugieren otros estudios sobre fibras naturales.

Las áreas promedio calculadas a partir de las micrografías procesadas fueron 0,80 mm² para el hilo de fique crudo, 0,74 mm² para el hilo mercerizado y 2,39 mm² (área aparente) para el hilo mercerizado recubierto con OG. A partir de otros estudios sobre alcalinización en fibras naturales, se estableció que la reducción del área en los hilos mercerizados se debe a la

reorganización y alineación de las moléculas de celulosa, relacionada también con el aumento de la cristalinidad, así como a la eliminación de impurezas y componentes no celulósicos de las fibras como resultado de la mercerización. Lo que genera una estructura de fibra más compacta y una sección transversal reducida.

El aumento significativo en el área de los hilos mercerizados recubiertos con OG se atribuye al área aparente calculada, que incluye todo el recubrimiento adicional. Para caracterizar adecuadamente el comportamiento de este material en tracción, se recomienda utilizar el área calculada para los hilos mercerizados, dado que las fibras mercerizadas son las que principalmente aportan resistencia al fique recubierto con óxido de grafeno.

La precisión en la determinación de las áreas de los hilos tratados depende de la exactitud con la que se utilicen las herramientas de dibujo del software Fiji en el procesamiento de imágenes. Además, se recomienda utilizar un aumento adecuado y una escala apropiada para los segmentos de hilo más dispersos, con el fin de evitar el recorte de fibras en la imagen y asegurar resultados más precisos.

El promedio de filamentos encontrados en un hilo de fique fue de 46,86. Este valor se considera altamente preciso dado que se extrajo de una muestra combinada de 451 hilos (1050 Nm) mediante un análisis estadístico entre dos estudios con características similares de hilos de fique. Los diámetros aparentes calculados para los filamentos de cada tipo de hilo se sitúan cerca del rango observado en otros estudios sobre fibras de fique. Por lo tanto, se puede afirmar que el procesamiento de imágenes con el software Fiji y la determinación de áreas mediante el algoritmo de Matlab generan resultados convincentes.

Referencias Bibliográficas

- Bastidas, K. G., Pereira, M. F. R., Sierra, C. A., & Zea, H. R. (2022). Study and characterization of the lignocellulosic Fique (*Furcraea Andina* spp.) fiber. *Cellulose*, 29(4), 2187–2198. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04377-6>
- Benjumea, J. M., Laverde, V., Quiceno, V., & Archila, S. (2022). 9 CIIME congreso internacional de materiales y estructuras. Aplicación de La Técnica de Correlación de Imágenes Digitales En La Caracterización de Mallas de Fibra de Fique En Tensión. <https://www.youtube.com/watch?v=VChjGkEIBTU&t=26041s>
- Da Fonseca, R. P., Rocha, J. C., & Cheriaf, M. (2021). Influence of Different Types of Treatments on Amazonian Vegetable Fibers on the Performance of Mortars Based on Portland Cement, Metakaolin and Fly Ash. *Materials Research*, 24. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0320>
- Delvasto, S., Toro, E. F., Perdomo, F., & de Gutiérrez, R. M. (2010). An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.01.010>
- Diaz-Ramirez, G. A., Sanchez, H. G., & Cruz, R. A. (2019). Correlation between cross sectional area and torsion degree of fique yarns by image analysis system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1247(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1247/1/012030>
- Fiji. (s.f). ImageJ (Win-64). <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z>

- Hernandez, J. H. M., Perea, E. F. T., Mejía, K. C., & Jacobo, C. A. M. (2020). Effect of fique fibers in the behavior of a new biobased composite from renewable Mopa-Mopa Resin. *Polymers*, 12(7), 1–15. <https://doi.org/10.3390/polym12071573>
- Laverde Sarmiento, V. (2023). Refuerzo externo de cilindros de concreto con fique 1 Respuesta a Compresión del Concreto Simple Reforzado Externamente con Mallas de Fibra de Fique Presentado por.
- Laverde, V., Marin, A., Benjumea, J. M., & Rincón Ortiz, M. (2022). Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. *Construction and Building Materials*, 340, 127729. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127729>
- Madhu, P., Sanjay, M. R., SenthamaraiKannan, P., Pradeep, S., Siengchin, S., Jawaid, M., & Kathiresan, M. (2020). Effect of Various Chemical Treatments of Prosopis juliflora Fibers as Composite Reinforcement: Physicochemical, Thermal, Mechanical, and Morphological Properties. *Journal of Natural Fibers*, 17(6), 833–844. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1534191>
- Madueke, C. I., Mbah, O. M., & Umunakwe, R. (2023). A review on the limitations of natural fibres and natural fibre composites with emphasis on tensile strength using coir as a case study. In *Polymer Bulletin* (Vol. 80, Issue 4, pp. 3489–3506). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04241-y>
- Mina, J. H. (2012). Caracterización físico-mecánica de un almidón termoplástico (tps) de yuca y análisis interfacial con fibras de fique. In *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* (Vol. 10, Issue 2). Julio-Diciembre. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/250/452>

- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). Cadena Agroindustrial del Fique. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Fique/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Muñoz-Blandón, O., Ramírez-Carmona, M., Rendón-Castrillón, L., & Ocampo-López, C. (2023). Exploring the Potential of Fique Fiber as a Natural Composite Material: A Comprehensive Characterization Study. *Polymers*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/polym15122712>
- Muñoz-Velez, M. F., Hidalgo-Salazar, M. A., & Mina-Hernandez, J. H. (2014). Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 12, 60–70. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612014000200007&nrm=iso
- Peinado, J., Ospina, L., Rodríguez, L., Miller, J., Carvajal, C., & Negrete, R. (2006). Guía ambiental del subsector fiquero. www.minambiente.gov.co
- Perrier, A., Touchard, F., Chocinski-Arnault, L., Mellier, D., & S. de Vasconcellos, D. (2015). Full-field Measurement at the Weave Scale in Hemp/Epoxy Composite Using Digital Image Correlation. <https://doi.org/10.1177/096739111502300901>
- Segal, L., Creely, J. J., Martin, A. E., & Conrad, C. M. (n.d.). opportunity for new developments in all phases of textile manufacturing.’ Literature Cited an Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. In *Apparel Manufacturing* (Vol. 43).
- Sreenivasan, V. S., Somasundaram, S., Ravindran, D., Manikandan, V., & Narayanasamy, R. (2011). Microstructural, physico-chemical and mechanical characterisation of *Sansevieria*

cylindrica fibres - An exploratory investigation. *Materials and Design*, 32(1), 453–461.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.004>

The MathWorks. (2024). MATLAB (R2024). Inc. <https://www.mathworks.com>


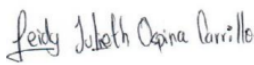
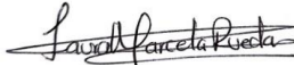
Tomczak, F., Satyanarayana, K. G., & Sydenstricker, T. H. D. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III - Morphology and properties of Brazilian curauá fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(10), 2227–2236.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.06.005>

Tomczak, F., Sydenstricker, T. H. D., & Satyanarayana, K. G. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(7), 1710–1721.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.02.004>


Zhou, T., Li, M., Zeng, B., Meng, Y., Chen, J., Xiang, C., Hu, C., & Yang, M. (2024). Effects of Pretreatment on the Microcharacterization and Fermentation of Bamboo Shoot Shells.
<https://doi.org/10.15376/biores.19.3.4604-4618>

Apéndices

Apéndice A. Cotización del servicio DRX emitida por el laboratorio de rayos X del PTG-UIS

	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Código: F-A-34		
	LABORATORIO DE RAYOS X		Versión: 06		
	COTIZACIÓN DE SERVICIOS		Elaborado: 2016 Página: 1 de 2 Folio No. _____		
INFORMACIÓN DEL CLIENTE			Cotización No.	COT-23006	
Solicitante	GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS- INME		NIT o C.C.	890.201.213-4	
Contacto	Nicolás David Díaz Zambrano				
Dirección	Carrera 27 calle 9				
Ciudad	Bucaramanga, Santander				
Teléfono	3176988155				
Correo electrónico	nicolas2180189@correo.uis.edu.co		Fecha (aaaa-mm-dd)	2024-01-29	
Servicios solicitados	DRX-01	Identificación de fases cristalinas por Difracción de Rayos X de muestra Bulk			
	DRX-06	Registro de datos por Difracción de Rayos X para análisis cualitativo y cuantitativo de muestra Bulk			
Con base en la solicitud recibida el día 24 de enero de 2023, nos permitimos poner a su consideración nuestra oferta de servicio.					
COSTO SERVICIO					
Código del Servicio	Ensayo	Método	No. Muestras	Valor unitario	Valor total
DRX-01	Análisis Cualitativo por DRX	Procedimiento interno del laboratorio P-T-06	3	\$ 206.000	\$ 618.000
DRX-06	Registro de datos por DRX	Procedimiento interno del laboratorio P-T-06	3	\$ 111.000	\$ 333.000
Nota: las indicaciones para la recepción de las muestras en el laboratorio se encuentran estipuladas en la pagina (2) del documento.				Valor total	\$ 951.000
Validez de la oferta: 17 de diciembre de 2024					
Elaboró:			Aprobó:		
					
Leidy Julieth Ospina Carrillo Auxiliar Administrativa			Laura Marcela Rueda Reyes Coordinadora Administrativa		

Apéndice B. Formato de remisión de muestras F-A-41 emitida por el Laboratorio de Rayos X del PTG-UIS

		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER LABORATORIO DE RAYOS X FORMATO REMISIÓN DE MUESTRAS PARA CLIENTES INTERNOS				Código: F-A-41 Versión: 04 Elaborado: 2019 Página: 1 de 1 Fólío No: _____	
Fecha (aaaa-mm-dd)		7/05/2024					
DATOS GENERALES DEL SERVICIO							
Diligencie el ítem (1), (2) o (3) de acuerdo con su situación:							
(1) Proyectos de investigación o trabajos de grado CON financiación interna:							
Título del trabajo o proyecto:		Determinación de la cristalinidad y el efecto de la tasa de deformación en el modo de rotura a tracción de hilos de fique con L=250 mm crudos y tratados bajo diferentes tasas de deformación a través de actividades experimentales en el marco del proyecto VIE-UIS 3954.		Pago por traslado de fondos:			
				Información para la cuenta de cobro		Código del fondo: 3954	
Nombre director del trabajo o proyecto:		José Miguel Benjumea Royero		Escuela:		Ingeniería Civil	
Nombre estudiante(s):		Nicolas David Diaz Zambrano		Código estudiante(s): 2180189		Teléfono(s) de contacto: 3176988155	
Correo (s) autorizado (s) para envío de informe:		nicolas2180189@correo.uis.edu.co josberro@uis.edu.co		Correo (s) para envío de cuenta de cobro: josberro@uis.edu.co		Cotización No: COT-24053	
(2) Trabajos de grado o tesis SIN financiación:							
Título del trabajo o tesis:		Importante: Si el director manifiesta que el trabajo de grado o tesis NO cuenta con financiación para poder cancelar los servicios prestados por el Laboratorio de Rayos X, debe tener en cuenta que: 1) El Laboratorio de Rayos X apoya a la investigación y a la docencia mediante la realización sin costo de los siguientes servicios: registro de datos por DRX (DRX-06), registro de datos de monocristal (DRM-01), análisis elemental cuantitativo por FRX y registro de datos ATR-IR. 2) Los autores se comprometen a expresar los agradecimientos a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y al Laboratorio de Rayos X, en los respectivos trabajos de grado o tesis, así como en artículos, ponencias, pósters y demás productos generados a partir de los resultados obtenidos mediante la colaboración prestada.					
		Nombre director del trabajo de grado o tesis:		Escuela:		Teléfono (s) de contacto:	
Nombre Estudiante(s):		Código Estudiante(s):		Teléfono (s) de contacto:			
Correo (s) autorizado (s) para envío de datos:							
(3) Proyectos o servicios de extensión:							
Título del proyecto o servicio de extensión:		Para pago por traslado de fondos:					
		Información para la cuenta de cobro		Código del fondo:		Nombre del fondo:	
Nombre del director de grupo o coordinador del laboratorio:		Nombre del laboratorio o grupo de investigación:		Teléfono (s) de contacto:			
Correo (s) autorizado (s) para envío de informe:		Correo (s) para envío de cuenta de cobro:		Cotización No:			
INFORMACIÓN DE TIPO DE ANÁLISIS							
Nombre de la muestra (Debe coincidir con el rótulo de la muestra)	Descripción de la muestra* (Información preliminar)	Tipo de Muestra (Orgánica-Inorgánicas Mineral-etc)	Tipo de ensayo (DRX-DRM-FRX-IR)	Se puede calcinar	Peso (g) (Preliminar de la muestra)	Se puede mezclar con parafina y/o alcohol	Observaciones
Fique Natural	Fibra de fique natural	Orgánica	DRX-01 Análisis Cualitativo por DRX	N/A	6	SI	Solo de ser necesario, mezclar con parafina y alcohol
Fique NaOH	Fibra de fique con tratamiento alcalino de hidróxido de sodio	Orgánica	DRX-01 Análisis Cualitativo por DRX	N/A	6	SI	Solo de ser necesario, mezclar con parafina y alcohol
Fibra de piña	Fibra de piña natural	Orgánica	DRX-01 Análisis Cualitativo por DRX	N/A	3	SI	Solo de ser necesario, mezclar con parafina y alcohol
Fórmula química							
INFORMACION ADICIONAL DE LA MUESTRA							
Esquema de síntesis del material de interés (Precursores, catalizadores, disolventes, producto)							
AGREGAR MOLÉCULA							
*Si cuenta con información adicional de la procedencia de las muestras como: fichas técnicas, tratamientos químicos o térmicos realizados, composición química, % de materia orgánica, etc., agradecemos adjuntarla, ya que esto permitirá realizar un mejor análisis e interpretación de los resultados.							

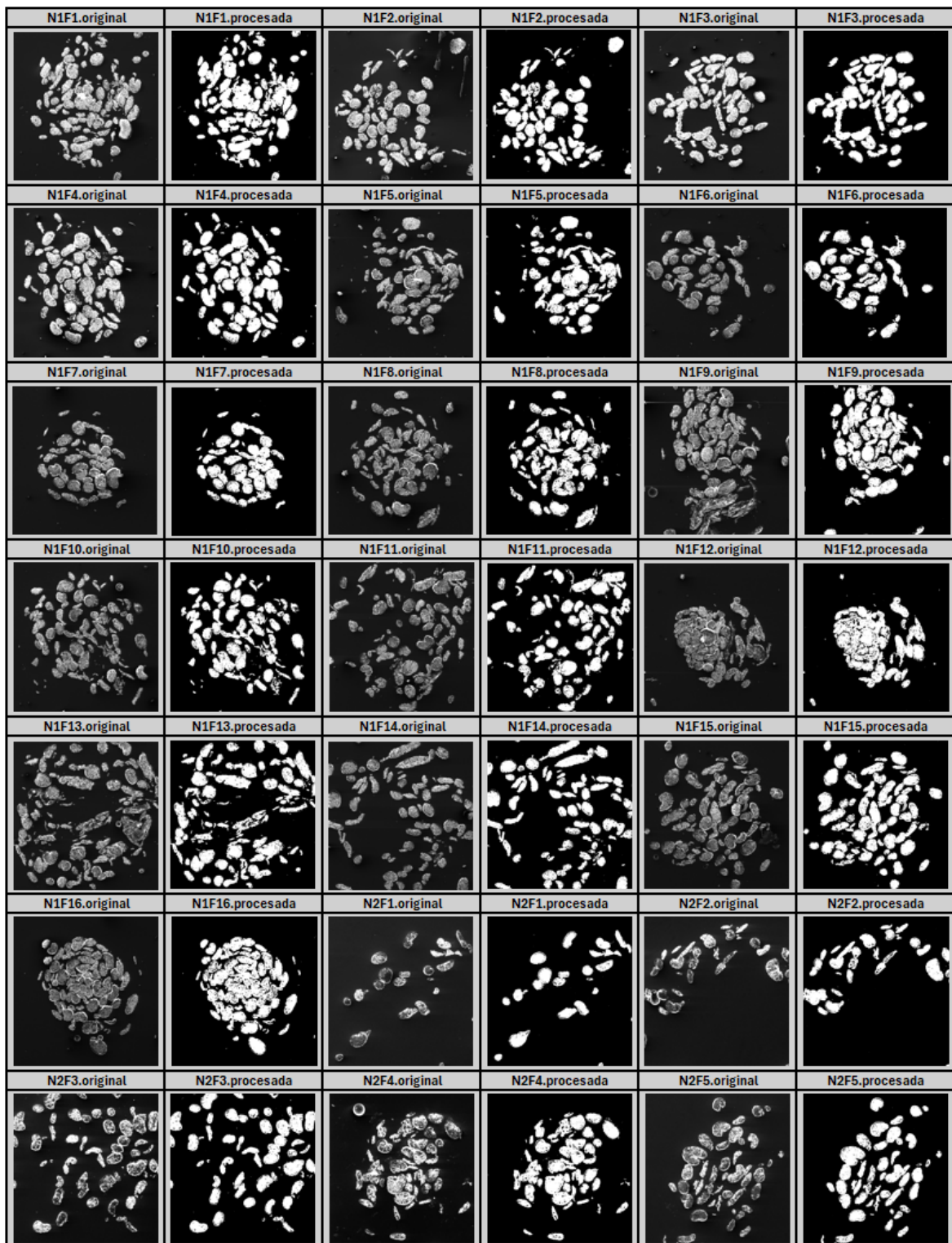
Apéndice C. Información de contacto de los laboratorios

Ensayo	Laboratorio	Universidad	Correo electrónico de contacto	Celular de contacto	Dirección	Edificio
DRX	Laboratorio de Rayos X	UIS-Sede Guatigará	calidadrx@uis.edu.co	+57 3162429557	Km. 2 Vía el Refugio Piedecuesta, Santander	Edificio de investigación, oficina N°104
MEB	Laboratorio de Nanotecnología	UPB-Sede Floridablanca	victor.cuellar@upb.edu.co	+57 3017562914	km. 7 Vía a piedecuesta Floridablanca, Santander	Edificio K, oficina K-006

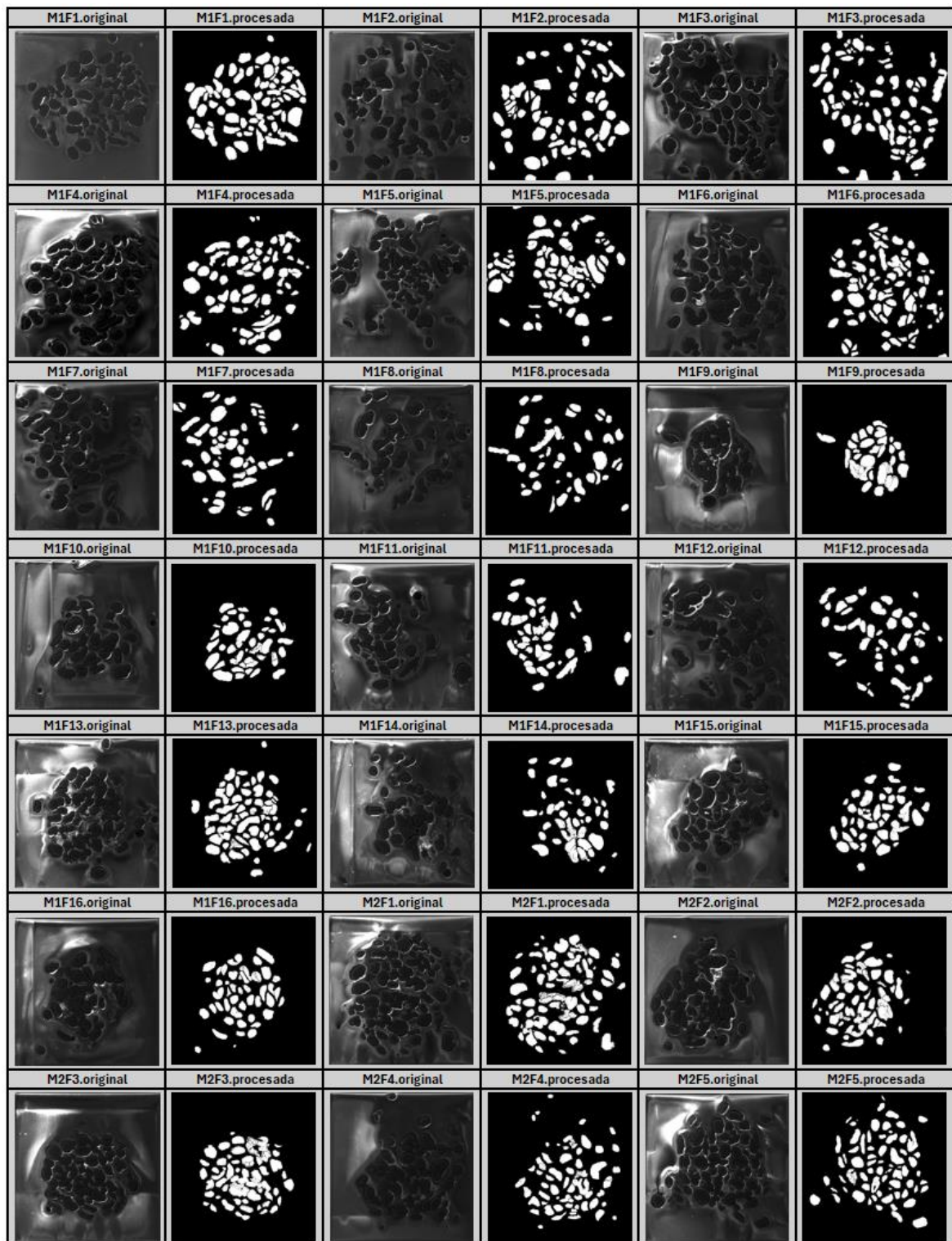
Apéndice D. Cotización del servicio del MEB emitida por el Laboratorio de Nanotecnología de la UPB

DESCRIPCIÓN DE CADA SERVICIO (como cliente EXterno a la U.P.B.)										PRECIO UNITARIO (cliente EXterno)	SUB-TOTAL (cliente EXterno)	
5	minutos en el SEM por cada muestra	x	144	muestras	" = "	720	minutos en el SEM	" = "	12,0	horas totales en el SEM	255.255	3.063.060
9	tandas de recubrimiento de oro por cada sesión	x	1	sesiones	" = "	9	sesiones de recubrimiento con oro	" = "	9,0	sesiones de recubrimiento con oro en total	58.013	522.117
0	sesiones de secado con CO2				" = "	0	sesiones de secado con CO2	" = "	0,0	sesiones de secado con CO2 en total	58.013	0
TOTAL SERVICIOS											3.585.177	
DESCRIPCIÓN DE CADA SERVICIO (como cliente INTERno a la U.P.B.)										PRECIO UNITARIO (cliente INTERno)	SUB-TOTAL (cliente INTERno)	
3	minutos en el SEM por cada muestra	x	144	muestras	" = "	432	minutos en el SEM	" = "	7,2	horas totales en el SEM	142.500	1.026.000
9	tandas de recubrimiento de oro por cada sesión	x	1	sesiones	" = "	9	sesiones de recubrimiento con oro	" = "	9,0	sesiones de recubrimiento con oro en total	21.800	196.200
0	sesiones de secado con CO2				" = "	0	sesiones de secado con CO2	" = "	0,0	sesiones de secado con CO2 en total	21.800	0
TOTAL SERVICIOS											1.222.200	

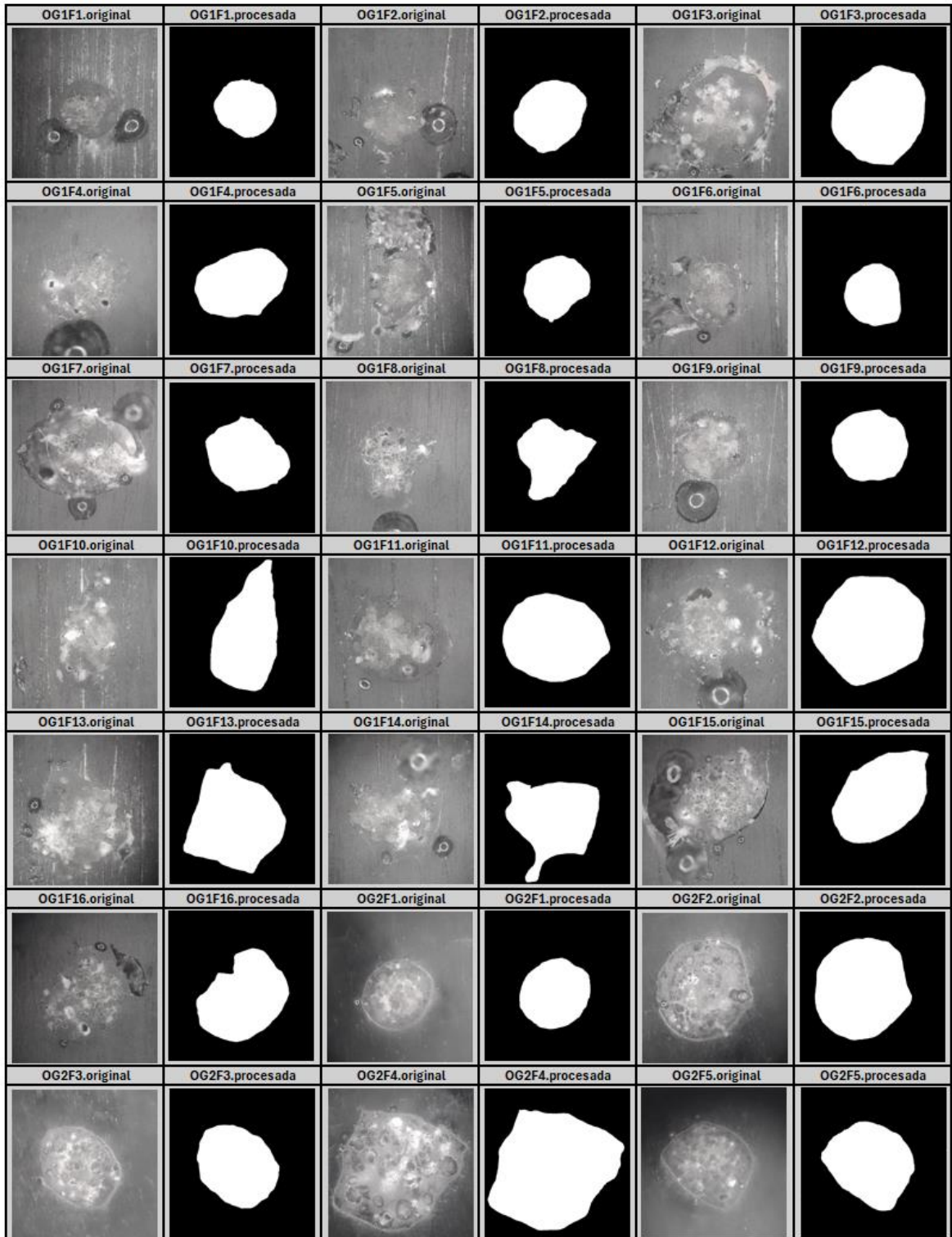
Apéndice E. Micrografías del fique crudo antes y después del procesamiento de imágenes



Apéndice F. Micrografías del fique mercerizado antes y después del procesamiento de imágenes



Apéndice G. Micrograffías del fique mercerizado y recubierto con OG antes y después del procesamiento de imágenes



Apéndice H. Código empleado para determinar las áreas

```

clc;
clear;
close all;
% Cargar umbrales desde el archivo Excel
umbralesTable = readtable('Umbrales.xlsx');
umbrales = umbralesTable.Umbral; % Suponiendo que la columna se llama 'Umbral'
imageFolder = 'Naturales/';
imagefiles = dir([imageFolder, '*.tif']);
nfiles = length(imagefiles); % Number of files found
areas = cell(nfiles, 4); % First column for filename, second for area in pixels, third for area in mm^2
for ii = 1:nfiles
    % Read data
    currentfilename = imagefiles(ii).name;
    img = imread([imageFolder, currentfilename]);
    % Preprocess data
    img = img(1:768, :); % Choose region of interest (ROI)
    % Show the image for user to select a region for area calculation
    imshow(img);
    title('Selecciona una región para analizar el área');
    h = impoly;
    wait(h);
    % Get coordinates of the polygon selected for area calculation
    mask = createMask(h);
    % Create a mask to black out the outside of the selected polygon
    mascara_negra = uint8(~mask) * 255;
    img(mascara_negra == 255) = 0;
    % Define threshold to classify dark and bright regions using the loaded threshold
    umbral = umbrales(ii); % Use the corresponding threshold for this image
    % Classify pixels into dark and bright regions
    region_oscura = img <= umbral;
    region_clara = img > umbral;
    % Create an image to visualize dark and bright regions
    imagen_dividida = uint8(zeros(size(img)));
    imagen_dividida(region_oscura) = 0; % Dark pixels
    imagen_dividida(region_clara) = 255; % Bright pixels
    imshow(imagen_dividida);
    title(currentfilename);
    % Label bright regions
    [L, Ne] = bwlabel(imagen_dividida);
    % Calculate area of labeled bright regions
    propied = regionprops(L);
    % Find areas larger than 100 pixels (adjust as necessary)
    s = find([propied.Area] > 100);
    % Calculate the final area in pixels
    Area_pixeles = sum([propied(s).Area]);
    % Image scale
    Longitud_en_pixeles = 223;
    Longitud_en_mm = 0.6;
    Resolucion = Longitud_en_pixeles / Longitud_en_mm;
    % Calculate the final area in mm^2
    Area_mm_2 = Area_pixeles / (Resolucion^2);
    % Store areas in the matrix
    areas{ii, 1} = currentfilename;
    areas{ii, 2} = Area_pixeles;
    areas{ii, 3} = Area_mm_2;
    areas{ii, 4} = umbrales(ii);
    % Save the processed image as PNG
    print('-dpng', currentfilename);
end

```

Apéndice I. Valores de área, número de filamentos, y diámetro aparente por filamento para todas las micrografías del fique crudo

Fibra	Área en Píxeles	Área en mm ²	N° de filamentos	Área de cada fibra (mm ²)	Diámetro aparente de cada fibra (mm ²)	Diámetro aparente de cada fibra (µm)
'N1F1.tif'	143129	0,804	59	0,0136	0,132	131,72
'N1F10.tif'	118287	0,856	47	0,0182	0,152	152,31
'N1F11.tif'	128325	0,929	51	0,0182	0,152	152,29
'N1F12.tif'	97882	0,709	38	0,0186	0,154	154,09
'N1F13.tif'	155350	1,125	50	0,0225	0,169	169,23
'N1F14.tif'	127280	0,921	43	0,0214	0,165	165,18
'N1F15.tif'	143090	1,036	50	0,0207	0,162	162,41
'N1F16.tif'	130433	0,944	51	0,0185	0,154	153,54
'N1F2.tif'	115129	0,833	45	0,0185	0,154	153,56
'N1F3.tif'	117041	0,847	45	0,0188	0,155	154,83
'N1F4.tif'	130019	0,941	48	0,0196	0,158	158,01
'N1F5.tif'	102842	0,744	40	0,0186	0,154	153,94
'N1F6.tif'	82997	0,601	30	0,0200	0,160	159,69
'N1F7.tif'	82452	0,597	35	0,0171	0,147	147,36
'N1F8.tif'	108344	0,784	45	0,0174	0,149	148,97
'N1F9.tif'	127043	0,920	47	0,0196	0,158	157,84
'N2F1.tif'	49660	0,360	20	0,0180	0,151	151,28
'N2F10.tif'	93993	0,680	39	0,0174	0,149	149,04
'N2F11.tif'	125039	0,905	46	0,0197	0,158	158,29
'N2F12.tif'	146577	1,061	55	0,0193	0,157	156,73
'N2F13.tif'	151928	1,100	60	0,0183	0,153	152,77
'N2F14.tif'	129882	0,940	50	0,0188	0,155	154,74
'N2F15.tif'	111661	0,808	45	0,0180	0,151	151,23
'N2F16.tif'	115291	0,835	43	0,0194	0,157	157,20
'N2F2.tif'	54015	0,391	21	0,0186	0,154	153,97
'N2F3.tif'	115959	0,839	40	0,0210	0,163	163,46
'N2F4.tif'	105357	0,763	36	0,0212	0,164	164,24
'N2F5.tif'	100201	0,725	33	0,0220	0,167	167,29
'N2F6.tif'	150570	1,090	53	0,0206	0,162	161,82
'N2F7.tif'	167261	1,211	56	0,0216	0,166	165,92
'N2F8.tif'	191789	1,388	71	0,0196	0,158	157,79
'N2F9.tif'	91194	0,660	39	0,0169	0,147	146,81
'N3F1.tif'	87212	0,631	26	0,0243	0,176	175,83
'N3F10.tif'	44128	0,319	21	0,0152	0,139	139,17
'N3F11.tif'	56941	0,412	22	0,0187	0,154	154,46
'N3F12.tif'	86559	0,627	32	0,0196	0,158	157,90
'N3F13.tif'	97636	0,707	44	0,0161	0,143	143,01
'N3F14.tif'	99341	0,719	40	0,0180	0,151	151,30
'N3F15.tif'	79949	0,579	33	0,0175	0,149	149,43
'N3F16.tif'	81483	0,590	36	0,0164	0,144	144,44
'N3F2.tif'	127724	0,925	46	0,0201	0,160	159,98
'N3F3.tif'	111497	0,807	32	0,0252	0,179	179,21
'N3F4.tif'	114083	0,826	40	0,0206	0,162	162,14
'N3F5.tif'	142509	1,032	51	0,0202	0,160	160,49
'N3F6.tif'	116688	0,845	53	0,0159	0,142	142,45
'N3F7.tif'	147757	1,070	58	0,0184	0,153	153,24
'N3F8.tif'	97227	0,704	45	0,0156	0,141	141,12
'N3F9.tif'	62337	0,451	30	0,0150	0,138	138,39

Apéndice J. Valores de área, número de filamentos, y diámetro aparente por filamento para todas las micrografías del fique mercerizado

Fibra	Área en Píxeles	Área en mm ²	N° de filamentos	Área de cada fibra (mm ²)	Diámetro aparente de cada fibra (mm ²)	Diámetro aparente de cada fibra (µm)
'M1F1.tif'	120696	0,874	52	0,0168	0,146	146,27
'M1F10.tif'	62700	0,454	31	0,0146	0,137	136,54
'M1F11.tif'	68639	0,497	32	0,0155	0,141	140,61
'M1F12.tif'	67924	0,492	35	0,0140	0,134	133,75
'M1F13.tif'	93807	0,679	49	0,0139	0,133	132,84
'M1F14.tif'	63917	0,463	36	0,0129	0,128	127,93
'M1F15.tif'	67557	0,489	31	0,0158	0,142	141,73
'M1F16.tif'	67070	0,486	38	0,0128	0,128	127,55
'M1F2.tif'	112041	0,811	46	0,0176	0,150	149,83
'M1F3.tif'	106835	0,773	48	0,0161	0,143	143,23
'M1F4.tif'	107131	0,776	43	0,0180	0,152	151,54
'M1F5.tif'	97622	0,707	39	0,0181	0,152	151,89
'M1F6.tif'	98510	0,713	50	0,0143	0,135	134,76
'M1F7.tif'	79456	0,575	34	0,0169	0,147	146,77
'M1F8.tif'	66339	0,480	30	0,0160	0,143	142,77
'M1F9.tif'	56800	0,411	30	0,0137	0,132	132,10
'M2F1.tif'	110403	0,799	52	0,0154	0,140	139,89
'M2F10.tif'	108136	0,783	67	0,0117	0,122	121,97
'M2F11.tif'	114176	0,827	65	0,0127	0,127	127,24
'M2F12.tif'	103169	0,747	72	0,0104	0,115	114,92
'M2F13.tif'	115453	0,836	74	0,0113	0,120	119,92
'M2F14.tif'	118333	0,857	68	0,0126	0,127	126,65
'M2F15.tif'	108704	0,787	65	0,0121	0,124	124,16
'M2F16.tif'	111864	0,810	79	0,0103	0,114	114,24
'M2F2.tif'	80605	0,584	48	0,0122	0,124	124,41
'M2F3.tif'	80997	0,586	47	0,0125	0,126	126,03
'M2F4.tif'	70150	0,508	39	0,0130	0,129	128,76
'M2F5.tif'	85820	0,621	51	0,0122	0,125	124,54
'M2F6.tif'	111594	0,808	56	0,0144	0,136	135,53
'M2F7.tif'	104504	0,757	56	0,0135	0,131	131,15
'M2F8.tif'	83333	0,603	55	0,0110	0,118	118,18
'M2F9.tif'	118818	0,860	74	0,0116	0,122	121,65
'M3F1.tif'	150891	1,092	75	0,0146	0,136	136,18
'M3F10.tif'	116682	0,845	67	0,0126	0,127	126,70
'M3F11.tif'	111235	0,805	63	0,0128	0,128	127,57
'M3F12.tif'	119584	0,866	70	0,0124	0,125	125,48
'M3F13.tif'	106801	0,773	69	0,0112	0,119	119,44
'M3F14.tif'	91942	0,666	49	0,0136	0,132	131,51
'M3F15.tif'	93639	0,678	59	0,0115	0,121	120,95
'M3F16.tif'	77685	0,562	52	0,0108	0,117	117,35
'M3F2.tif'	147168	1,065	73	0,0146	0,136	136,32
'M3F3.tif'	143400	1,038	65	0,0160	0,143	142,60
'M3F4.tif'	156968	1,136	80	0,0142	0,134	134,48
'M3F5.tif'	135118	0,978	61	0,0160	0,143	142,89
'M3F6.tif'	126629	0,917	63	0,0146	0,136	136,11
'M3F7.tif'	121028	0,876	70	0,0125	0,126	126,24
'M3F8.tif'	107094	0,775	49	0,0158	0,142	141,93
'M3F9.tif'	108497	0,785	53	0,0148	0,137	137,36

Apéndice K. Valores del área para todas las micrografías del hilo de fique mercerizado recubierto con óxido de grafeno

Fibra	Área en Píxeles	Área en mm ²
'OG1F1.tif'	72600	1,143
'OG1F2.tif'	103021	1,622
'OG1F3.tif'	186243	2,935
'OG1F4.tif'	125942	1,983
'OG1F5.tif'	82036	1,292
'OG1F6.tif'	74352	1,171
'OG1F7.tif'	116955	1,842
'OG1F8.tif'	100793	1,587
'OG1F9.tif'	114051	1,796
'OG1F10.tif'	160150	2,522
'OG1F11.tif'	190235	2,996
'OG1F12.tif'	243615	3,836
'OG1F13.tif'	195056	3,073
'OG1F14.tif'	155887	2,529
'OG1F15.tif'	169935	2,676
'OG1F16.tif'	152924	2,408
'OG2F1.tif'	101900	1,605
'OG2F2.tif'	201945	3,180
'OG2F3.tif'	135102	2,127
'OG2F4.tif'	302143	4,812
'OG2F5.tif'	149720	2,358
'OG2F6.tif'	213493	3,362
'OG2F7.tif'	151853	2,391
'OG2F8.tif'	135477	2,133
'OG2F9.tif'	147734	2,326
'OG2F10.tif'	130850	2,061
'OG2F11.tif'	263825	4,174
'OG2F12.tif'	135909	2,140
'OG2F13.tif'	101242	1,594
'OG2F14.tif'	99082	1,560
'OG2F15.tif'	119346	1,879
'OG2F16.tif'	111959	1,763
'OG3F1.tif'	166831	2,627
'OG3F2.tif'	149479	2,354
'OG3F3.tif'	170177	2,734
'OG3F4.tif'	86606	1,364
'OG3F5.tif'	106692	1,680
'OG3F6.tif'	114554	1,804
'OG3F7.tif'	65303	1,029
'OG3F8.tif'	101746	1,602
'OG3F9.tif'	220394	3,481
'OG3F10.tif'	208981	3,341
'OG3F11.tif'	116187	1,830
'OG3F12.tif'	147140	2,317
'OG3F13.tif'	212157	3,341
'OG3F14.tif'	162561	2,560
'OG3F15.tif'	221131	3,539
'OG3F16.tif'	268639	4,265