

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ciencias

Escuela Profesional de Física Aplicada

**CARACTERIZACIÓN DEL GROSOR DE LAS FIBRAS DE LANA DE
LOS CAMÉLIDOS SUDAMERICANOS POR DIFRACCIÓN ÓPTICA
EN LA REGIÓN DE TACNA**

TESIS

Presentada por:

Bach. Jade Yasmin Aguayo Julca

Para optar el Título Profesional de:

LICENCIADO EN FÍSICA

TACNA - PERÚ

2026



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS Nro. 471

En la ciudad de Tacna, en el auditorium de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann; siendo las 12:10 horas del día 03 de Julio del 2026, estando presente el jurado calificador nominado con Resolución de Facultad Nro. 11820- - 2026 FACI-UNJBG, conformado por los siguientes docentes:

Dr. Hugo Alfredo Torres Muro (Presidente)
Dr. Carlos Armando Polo Bravo (Secretario)
Dr. Jovanetty Iván Choque Aquino (Vocal)

Acto seguido, se dio lectura a la Resolución correspondiente, y del mismo modo se informa a la (al) Bachiller que el acto de sustentación constará de dos partes: (I) exposición y sustentación de la tesis, (II) absolución de preguntas del jurado. Todo ello en un tiempo no mayor a 60 minutos ni menor a 30 minutos. A continuación, el presidente del Jurado instó a la (al) Bachiller:

Jade Yasmín Aguayo Tulca
 a exponer la Tesis titulada:

"Caracterización del grosor de las fibras de lana de los camélidos sudamericanos por difracción óptica en la región de Tacna"

para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

Siendo las 13:10 horas, la (el) tesisista concluye su exposición, luego se procedió a la formulación de las preguntas por parte de los miembros del jurado calificador, terminado este proceso, se invitó al público presente a abandonar la sala de sustentación para que los miembros del jurado emitan su calificación de acuerdo a reglamento. El promedio de la calificación dio el siguiente resultado: Aprobada por unanimidad con nota de dieciseis (16), de acuerdo al Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - Tacna.

Siendo las 13:16 horas, se dio por concluido el acto de sustentación de la tesis, firmando los miembros del jurado calificador, en señal de conformidad.

Dr. Hugo Alfredo Torres Muro
 Presidente

Dr. CARLOS ARMANDO POLO BRAVO
 Secretario

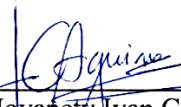
Dr. Jovanetty Iván Choque Aquino
 Vocal

CONSTANCIA DE SIMILITUD

Yo, **Dr. JOVANETTY IVAN CHOQUE AQUINO**, docente adscrito al Departamento Académico de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, en condición de Asesor, designado mediante la Resolución de Facultad N.º 11551-2025-FACI-UNJBG, de la tesis titulada: "**CARACTERIZACIÓN DEL GROSOR DE LAS FIBRAS DE LANA DE CAMÉLIDOS SUDAMERICANOS POR DIFRACCIÓN ÓPTICA EN LA REGIÓN DE TACNA**", desarrollada por la Bach. Jade Yasmin Aguayo Julca, dejo constancia que el análisis de la tesis mediante el software de similitud textual **TURNITIN** arroja **UNA SIMILITUD DEL 5 %**, acreditándose la originalidad del trabajo de investigación y encontrándose dentro de los parámetros establecidos por la Universidad.

La presente constancia de similitud se expide en cumplimiento de las normas reglamentarias de la Universidad, para efectos de la continuidad del trámite de titulación.

Tacna, 27 de Julio de 2026



Dr. Jovanny Ivan Choque Aquino

Asesor de Tesis



Bach. Jade Yasmin Aguayo Julca

Autor de la Tesis

**“CARACTERIZACIÓN DEL GROSOR DE LAS FIBRAS DE LANA DE LOS
CAMÉLIDOS SUDAMERICANOS POR DIFRACCIÓN ÓPTICA EN LA
REGIÓN DE TACNA”**



Dr. Jovanety Ivan Choque Aquino

Asesor de Tesis



Bach. Jade Yasmin Aguayo Julca

Autor de la Tesis

Agradecimientos

A Dios, por brindarme fortaleza, sabiduría y perseverancia durante toda mi vida y en el desarrollo de la presente investigación.

A mis padres, Eva y Genaro, y a mi hermano Daniel por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante en cada etapa de mi formación profesional y personal.

Mi especial agradecimiento a mi asesor al Dr. Jovanetty Iván Choque Aquino, por su orientación, dedicación, conocimientos y apoyo brindado durante el desarrollo de esta tesis.

Asimismo, agradezco al proyecto de investigación “Determinación de la morfología de partes del cuerpo humano mediante proyección de franjas para aplicaciones médicas”, por el uso de materiales y equipos para la realización de la presente investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron al logro de este trabajo de investigación.

Índice

Agradecimientos	v
Índice de figuras	x
Índice de tablas	xii
Glosario de abreviaturas.....	xiii
Resumen.....	1
Abstract.....	2
I. Descripción de la investigación	3
1.1. Antecedentes del problema	3
1.2. Planeamiento del problema	4
1.3. Descripción del problema	6
1.4. Formulación del problema.....	7
1.4.1. Problema general	7
1.4.2. Problemas específicos	7
1.5. Justificación de la investigación	7
1.5.1. Justificación metodológica	7
1.5.2. Justificación económica	8
1.5.3. Justificación teórica	8

1.5.4. Justificación ambiental	9
1.6. Objetivos de la investigación	9
1.6.1. Objetivo general	9
1.6.2. Objetivos específicos	9
1.7. Hipótesis de la investigación:	10
1.7.1. Hipótesis general	10
1.7.2 Hipótesis específicas	10
1.8. Operacionalización de las variables	10
1.8.1. Variable independiente.....	10
1.8.2. Variable dependiente.....	10
1.9. Limitación de investigación	11
II. Marco teórico	13
2.1. Antecedentes de investigación	13
2.2. Principio de Huygens-Fresnel	15
2.3. Difracción.....	16
2.3.1. Varios osciladores coherentes	17
2.3.2. Difracción de una sola rendija	19
2.3.3. Difracción de Fraunhofer:	22
2.3.4. Difracción de Fresnel	25
2.4. Camélidos sudamericanos.....	27

2.4.1. Alpaca.....	28
2.4.2. Llama	29
2.4.3. Vicuña.....	30
2.5. Industria textil de fibras de camélidos	32
III. Metodología	33
3.1. Materiales y equipos	33
3.1.1. Lista de materiales	33
3.1.2. Lista de equipos y/o instrumento	33
3.1.3. Lista de muestras	33
3.1.4. Lista de software.....	34
3.2. Proceso de desarrollo de investigación	34
3.2.1. Implementación del sistema experimental de difracción óptica.....	34
3.2.2. Medición de las fibras de lana de los camélidos sudamericanos	37
IV. Resultados y discusión	45
4.1. Medidor de fibras implementado	45
4.2. Grosos de fibra de CSA	47
4.2.1 Fibra de alpaca	48
4.2.2. Llama	48
4.2.3. Vicuña.....	48
4.3. Discusión.....	52

V. Conclusiones	57
5.1. Conclusiones	57
5.2. Recomendaciones.....	59
5.3. Trabajos futuros	60
Referencias	61
Anexo A: Presentación en RIAO - OPTILAS.....	67
Anexo B: Póster presentado en evento	68
Anexo C: Certificado del evento	69
Anexo D: Rutina en MATLAB para la caracterización del grosor de la fibra de lana de CSA	70
Anexo E: Camélidos sudamericanos	74

Índice de Figuras

Figura 1	Difracción en una abertura pequeña.	16
Figura 2	Representación de frentes de onda emitidos por osciladores coherentes.	17
Figura 3	Esquema de la difracción de una sola rendija y distribución de intensidad.....	20
Figura 4	Propagación de luz a través de una abertura pequeña.	21
Figura 5	Representación del modelo unidimensional de difracción de una rendija.	21
Figura 6	Gráfico del patrón de difracción de Fraunhofer para una ranura	24
Figura 7	Transición de la difracción de Fresnel al de Fraunhofer en una rendija simple. ...	26
Figura 8	Patrón de difracción de Fraunhofer producido por una rendija simple.	27
Figura 9	Camélidos sudamericanos	28
Figura 10	Fotografía de una Alpaca en Riso Park Pachia	29
Figura 11	Fotografía de una Llama en Riso Park Pachia	30
Figura 12	Fotografía de una Vicuña en ruta de Caravelí con Moquegua	31
Figura 13	Fotografía de 03 Guanacos en la región de Tacna	32
Figura 14	Montaje experimental para la difracción de Fraunhofer.	34
Figura 15	Diagrama del arreglo experimental de difracción de Fraunhofer	36
Figura 16	Fotografía de muestras	38
Figura 17	Preparación de muestras de fibra de vicuña.	39
Figura 18	Preparación de muestras de fibra de llama	40
Figura 19	Preparación de muestras de fibra de alpaca	41

Figura 20 Patrones de difracción de 60 muestras,	42
Figura 21 Rutina en Matlab	43
Figura 22 Patrón de difracción RBG – Matlab.....	44
Figura 23 Patrón de intensidad	44
Figura 24 Distancia de la muestra hacia la pantalla.	46
Figura 25 Resultado del grosor para una fibra de alpaca.	47

Índice de Tablas

Tabla 1	Operacionalización de la variable independiente.....	10
Tabla 2	Operacionalización de la variable dependiente	11
Tabla 3	Resultados del grosor de fibra de Alpaca.	49
Tabla 4	Resultados del grosor de fibra de Llama.	50
Tabla 5	Resultados del grosor de fibra de Vicuña.	51
Tabla 6	Tabla comparativa	54

Glosario de abreviaturas

CSA	: Camélidos Sudamericanos
E :	Campo eléctrico
$\tilde{E}$	: Campo eléctrico complejo
$\tilde{E}^*$	: Conjugado complejo del campo eléctrico
ε_L	: Amplitud de la fuente
I	: Intensidad
I_0	: Intensidad máxima
k	: Número de onda, $k = 2\pi/\lambda$
λ :	Longitud de onda
ω	: Frecuencia angular
t	: Tiempo
R	: Distancia al plano de observación.
Θ	: Ángulo de difracción
D	: Ancho de la franja opaca
B	: Parámetro de difracción
m	: Orden de difracción
P	: Punto de observación
$e^{(i\phi)}$	: Representación compleja de una onda armónica con fase ϕ

Resumen

En la región de Tacna, Perú, el grosor de la fibra de lana de los camélidos sudamericanos determina su calidad textil y su valor en el mercado. Debido a su impacto económico, resulta esencial contar con métodos de medición precisos, reproducibles y accesibles. La presente investigación tiene como objetivo caracterizar el grosor de la fibra de alpaca, llama, vicuña y guanaco mediante difracción óptica de Fraunhofer. Para ello, se analizaron veinte fibras por cada especie, las cuales fueron tensadas individualmente en un soporte experimental y expuestas a un haz láser monocromático verde ($\lambda = 532 \text{ nm}$). La fibra actuó como un obstáculo difractor, generando un patrón de intensidad cuya distribución fue registrada digitalmente.

Las imágenes obtenidas fueron procesadas mediante una rutina desarrollada en MATLAB, permitiendo determinar el diámetro de cada fibra a partir de la relación entre la separación de franjas y el modelo teórico de difracción. Los resultados experimentales obtenidos presentan valores promedio de $26.53 \pm 1.12 \text{ }\mu\text{m}$ para alpaca, $37.39 \pm 2.95 \text{ }\mu\text{m}$ para llama y $13.27 \pm 0.68 \text{ }\mu\text{m}$ para vicuña. Estos valores se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura científica para fibras de camélidos sudamericanos.

Se concluye que la difracción óptica constituye una técnica no destructiva, de bajo costo y adecuada para la caracterización cuantitativa del grosor de las fibras de los camélidos sudamericanos, con potencial aplicación en control de calidad y certificación textil.

Palabras claves: Camélidos sudamericano, fibra de lana, difracción de Fraunhofer, grosor, láser verde.

Abstract

In the Tacna region of Peru, the thickness of South American camelid (SAC) wool fibers determines their textile quality and market value. Because of its economic impact, it is essential to have measurement methods that are precise, reproducible, and accessible. This research aims to characterize the fiber thickness of alpaca, llama, vicuña, and guanaco using Fraunhofer optical diffraction. For this purpose, twenty fibers from each species were individually stretched on an experimental support and exposed to a monochromatic green laser beam ($\lambda = 532 \text{ nm}$). The fiber acted as a diffracting obstacle, generating an intensity pattern whose distribution was digitally recorded.

The obtained images were processed through a routine developed in MATLAB, allowing the determination of each fiber's diameter based on the relationship between fringe spacing and the theoretical diffraction model.

The experimental results showed average values of $26,53 \pm 1.12 \text{ }\mu\text{m}$ for alpaca, $37.39 \pm 2.95 \text{ }\mu\text{m}$ for llama, and $13.27 \pm 0.68 \text{ }\mu\text{m}$ for vicuña. These values are within the ranges reported in the scientific literature for South American camelid fibers.

It is concluded that optical diffraction constitutes a non-destructive, low-cost technique suitable for the quantitative characterization of South American camelid fiber thickness, with potential applications in textile quality control and certification.

Keywords: South American Camelid, fiber wool, Fraunhofer diffraction, thickness, green laser.

I. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes del problema

La caracterización del diámetro de microfibras mediante técnicas ópticas ha sido objeto de estudio desde hace varias décadas, debido a su importancia en la industria textil y en la ciencia de materiales. A nivel internacional, Hecht (2017) describe detalladamente la teoría de la difracción de Fraunhofer aplicada a rendijas y objetos filamentosos, estableciendo la relación entre el patrón de difracción y el tamaño del objeto. Este fundamento teórico ha permitido el desarrollo de metodologías experimentales para la medición del diámetro de fibras a partir del análisis de mínimos de difracción. Diversos estudios han aplicado esta técnica para la medición de sintéticas y biológicas. Por ejemplo, trabajos experimentales reportan el uso de sistemas láser y procesamiento digital de imágenes para determinar el diámetro de fibras textiles con buena precisión, resaltando la rapidez y bajo costo del método frente a técnicas microscópicas convencionales (Cortés Osorio et al., 2013; Rojas Vigo, 2006). En el ámbito nacional, investigadores sobre fibra de camélidos sudamericanos se han centrado principalmente en la evaluación de propiedades físicas mediante métodos tradicionales. Quispe-Ccasa et al.(2020) analizaron la calidad de fibra de alpaca empleando técnicas microscópicas, destacando la importancia del diámetro como parámetro determinante del valor comercial. Asimismo, Meza Núñez (2018) reporta estudios de caracterización de fibra de alpaca en regiones altoandinas utilizando equipamiento especializado, evidenciando las limitaciones de acceso a estos instrumentos en zonas rurales.

Sin embargo, en la región de Tacna no se registran investigaciones previas que apliquen la técnica de difracción óptica de Fraunhofer para la medición del grosor

de fibra de los camélidos sudamericanos. Esto evidencia una brecha de conocimiento y aplicación tecnológica, ya que no se cuenta con estudios locales que validen esta metodología como alternativo accesible frente a los métodos tradicionales. En consecuencia, el presente estudio busca contribuir al desarrollo de una metodología experimental basada en difracción óptica para la caracterización del grosor de fibras de lana de los camélidos sudamericanos en la región de Tacna, aportando evidencia sobre su precisión y viabilidad de aplicación en contextos con recursos limitados.

1.2. Planeamiento del Problema

La producción de fibra de camélidos sudamericanos constituye una actividad económica clave para las comunidades altoandinas del Perú. La calidad de la fibra determina principalmente por su grosor y uniformidad, define su valor comercial y su aceptación en la industria textil de alta gama (Rodríguez Iglesias, 1998; Quispe et al., 2009). En particular, fibras finas como la denominada *alpaca baby*, alcanzan precios superiores en el mercado internacional debido a su mayor suavidad y grosor (Quispe et al., 2023). Por ello, la determinación precisa del grosor de la fibra resulta esencial tanto para fines productivos como comerciales.

En la actualidad, la medición del grosor de fibra se realiza mediante técnicas convencionales como el *microscopio de proyección*, el cual tuvo un impacto significativo entre los años 1927 y 1949 (Quispe et al., 2009). Posteriormente, se desarrollaron tecnologías más avanzadas, entre las que destacan el *Sirolan Laserscan* (analizador laser de fibras), el *Analizador Óptico de Diámetro de Fibra* (OFDA) y el *Fiber EC* (contador y medidor electrónico de fibras), utilizados en diversas instituciones para el análisis de fibras textiles (Aguilar Calla, 2012; SGS Wool Testing Services, 2009;

Walker et al., 2021). Estos equipos ofrecen alta precisión y procesamiento automatizado. Si bien estos métodos presentan alta precisión, su aplicación presentan limitaciones asociadas al elevado costo de los equipos, la necesidad de infraestructura especializada y personal capacitado. Estas restricciones dificultan su implementación en regiones con menos acceso a laboratorios Tecnológicos, como ocurre en diversas zonas productoras de camélidos en el sur del Perú, incluida la región de Tacna.

En concreto, la difracción óptica, particularmente en la difracción de Fraunhofer, ha demostrado ser una técnica no destructiva, rápida y de bajo costo para la determinación del grosor de fibra de lana. Esta metodología se basa en el análisis del patrón de difracción generado cuando un haz incide sobre una fibra tensada, permitiendo inferir su diámetro a partir de principios ópticos bien establecidos (Fernando, 2020; Hecht, 2017). Sin embargo, su aplicación en la caracterización de fibra de lana de los camélidos sudamericanos aun es limitada a nivel regional, y existen pocos estudios que validen su precisión frente a los métodos tradicionales en condiciones locales de medición.

La presente investigación tiene como objetivo la caracterización del grosor de la fibra de lana de los camélidos sudamericanos por difracción óptica, empleando un sistema experimental de bajo costo. El estudio se llevó a cabo en la región de Tacna y considero cuatro especies: alpaca, llama, vicuña y guanaco. Para cada especie se seleccionaron 20 fibras, conformando una base de datos experimental que fue contrastada con valores reportados en la literatura científica y técnica. De este modo, se busca evaluar la viabilidad de la técnica de difracción óptica de Fraunhofer como una alternativa confiable, económica y aplicable en entornos con recursos limitados, contribuyendo a cerrar la brecha tecnológica existente en la caracterización del grosor de fibra de lana de

camélidos sudamericanos en la región de Tacna y fortaleciendo la competitividad de los productores locales en el mercado textil.

1.3. Descripción del Problema

La lana de los camélidos sudamericanos, como la alpaca y la vicuña, es valorada por su suavidad, finura y otras propiedades que la hacen ideal para la industria textil de alta gama. El primer corte de las alpacas, conocido como baby alpaca, es particularmente apreciado por su extrema suavidad, lo que lo convierte en un producto más costoso. Quispe-Ccasa et al. (2020) analizaron características de finura y resistencia en vellones de llama, destacando la importancia del diámetro como parámetro de calidad. Sin embargo, una de las principales dificultades que enfrenta esta industria es la caracterización precisa del grosor de las fibras, ya que este parámetro influye directamente en la calidad del producto final. Los métodos tradicionales para medir el grosor de las fibras, como el uso de microscopios electrónicos de barrido (SEM) o dispositivos mecánicos, son costosos, requieren equipamiento sofisticado y personal altamente calificado.

A pesar de su precisión, estas técnicas no siempre son viables en entornos con recursos limitados, como laboratorios en zonas rurales o regiones donde los camélidos son criados. Por lo tanto, surge la necesidad de desarrollar y validar métodos alternativos, más accesibles y eficientes, que puedan ser utilizados en condiciones menos especializadas. La técnica de difracción óptica, en particular el uso de la difracción de Fraunhofer ofrece una opción viable para la medición del grosor de las fibras de manera precisa y menos costosa. Sin embargo, es necesario establecer si esta técnica puede

proporcionar resultados comparables a los métodos convencionales en términos de precisión.

1.4. Formulación del Problema

1.4.1. Problema general

¿En qué medida la técnica de difracción óptica de Fraunhofer permite determinar el grosor de las fibras de lana de camélidos sudamericanos (alpaca, llama, vicuña y guanaco)?

1.4.2. Problemas Específicos

- ¿De qué manera se debe implementar un sistema óptico basado en la difracción de Fraunhofer para obtener patrones de difracción producidos por fibras de lana de camélidos sudamericanos?
- ¿Cuál es el grosor promedio de las fibras de alpaca, llama, vicuña y guanaco determinado mediante la técnica de difracción óptica de Fraunhofer?

Justificación de la investigación.

1.5. Justificación de la Investigación

1.5.1. Justificación Metodológica

La implementación de técnicas accesibles para la caracterización del grosor de la fibra de lana de CSA beneficiará directamente a los criadores y productores de camélidos sudamericanos en el Perú, especialmente en comunidades de la zona altoandina de Tacna, donde esta actividad es la fuente principal de ingresos. Al contar con un instrumento de medición preciso para evaluar la calidad de la fibra, los productores podrán mejorar sus prácticas de selección y producción, aumentando el

valor de su producto y promoviendo el bienestar socioeconómico de sus comunidades. Además, este estudio fortalece el reconocimiento cultural de la lana de camélidos como un recurso valioso y propio de la región de Tacna.

1.5.2. Justificación Económica

La precisión en la medición del grosor de la fibra es importante, ya que está relacionado directamente con el precio de las fibras en el mercado textil. Fibras de menor grosor y alta calidad, como la "baby alpaca," alcanzan precios más altos y son demandadas en la industria textil de alta gama. La técnica de difracción óptica ofrece una solución de menor costo que los métodos tradicionales y existentes, permitiendo que los productores puedan asegurar la calidad de sus productos de manera más rentable, lo cual va a mejorar su competitividad en los mercados nacionales e internacionales.

1.5.3. Justificación Teórica

Este estudio contribuye al avance científico en la caracterización de fibras naturales al explorar la viabilidad de la difracción óptica, específicamente el patrón de Fraunhofer, como una alternativa práctica y precisa para medir el grosor de las fibras. La investigación se hará mediante comparación la precisión de esta técnica en comparación con métodos convencionales, sino que también generará conocimiento sobre la posibilidad de implementar un prototipo básico en áreas rurales o en laboratorios con recursos limitados.

1.5.4. Justificación Ambiental

La medición por difracción óptica que proponemos es una técnica no invasiva y de no contacto, lo que significa que no requiere modificar o dañar las fibras durante el proceso de medición. Esto es especialmente importante en estudios de fibras de camélidos, ya que permite conservar el recurso en su estado natural y evita la generación de residuos o el uso de sustancias químicas, como por ejemplo el *Siroscan-Laserscan*. Nuestra propuesta promueve técnicas respetuosas con el medio ambiente y sostenibles, este estudio contribuye a un manejo responsable y ético de las fibras de lana de camélidos sudamericanos, previamente esquilada por sus criadores.

1.6. Objetivos de la investigación

1.6.1. Objetivo General

Determinar el grosor de la fibra de lana de camélidos sudamericanos mediante el método de la difracción óptica en la región de Tacna.

1.6.2. Objetivos específicos

- Implementar un arreglo óptico para generar patrones de difracción de Fraunhofer.
- Estimar el grosor de fibra de lana de camélidos sudamericanos a través de patrones de difracción.

1.7. Hipótesis de la investigación:

1.7.1. Hipótesis General

La técnica de difracción óptica nos permite medir el grosor de fibras de lana de camélidos sudamericanos.

1.7.2 Hipótesis Especificas

- Es factible implementar un montaje óptico para la obtención del patrón de difracción de Fraunhofer
- Los patrones de difracción óptica de Fraunhofer obtenidos a partir de fibras de lana de camélidos sudamericanos permiten la estimación precisa del grosor de las fibras.

1.8. Operacionalización de las variables

1.8.1. Variable independiente

- Fibras de lana de los camélidos sudamericanos de guanaco, vicuña, llama, alpaca.

1.8.2. Variable dependiente

- Grosor de la fibra de camélidos sudamericanos.

Tabla 1

Operacionalización de la variable independiente.

Variable independiente	Indicador	Unidades
Fibras de lana de los CSA de guanaco, vicuña, llama, alpaca.	Diámetro promedio	Micrómetros (μm)

Tabla 2

Operacionalización de la variable dependiente

Variable	Indicador	Unidades
Grosor de fibra de lana de CSA	Patrón de difracción	Micrómetros (μm)

1.9. Limitación de investigación

El estudio sobre la caracterización del grosor de fibras de lana de camélidos sudamericanos en la región de Tacna mediante difracción óptica presenta varias limitaciones inherentes tanto en la parte metodológica como en su aplicabilidad. En primer lugar, este estudio se centró exclusivamente en camélidos sudamericanos, alpaca, llama, guanaco y la vicuña; los cuales tienen una presencia en la región de Tacna. No obstante, el análisis no abordará las posibles diferencias biológicas entre especies ni factores específicos lo que puedan influir en el grosor de la fibra, limitando así el alcance del estudio a un enfoque más teórico. Nuestra técnica permite medir el grosor de diferentes fibras, sin importar la procedencia de la misma. El grosor de la fibra no debe superar las 1000λ ($\lambda = 532 \text{ nm}$). Por otra parte, el ancho de la fibra no debe superar el diámetro de la mancha del láser). En contra parte, no existe un límite inferior para el grosor. En cuanto a la comercialización, aunque las fibras de alpaca son ampliamente valoradas y exportadas, este estudio no examinará el impacto directo del grosor de la fibra en términos de precio, lo que restringe el análisis a un contexto técnico de caracterización de fibras. Desde el punto de vista metodológico, la técnica óptica de difracción, en particular el uso de la difracción de Fraunhofer tiene limitaciones en su precisión debido a factores como la alineación del montaje óptico y la no uniformidad

del grosor de las fibras. Cualquier variación en la posición de las fibras o en la configuración óptica podría introducir incertidumbre en las mediciones, lo que puede afectar la exactitud de los resultados. Además, el grosor de las fibras se caracterizará como un promedio, sin capturar la variabilidad específica de cada fibra.

Finalmente, debido a las limitaciones en el acceso a equipos avanzados, como el microscopio electrónico de barrido (SEM), en ciertos momentos de la investigación, la validación de los resultados obtenidos mediante difracción óptica podría no ser posible en todos los casos. Esto restringe la capacidad para comparar directamente los resultados y confirmar la efectividad del método propuesto.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

La difracción óptica es un fenómeno físico que ocurre cuando una onda luminosa encuentra un obstáculo o una rendija de dimensiones comparables a su longitud de onda, generando un patrón de difracción (Hecht, 2017). En el caso de fibras delgadas, como las de los camélidos sudamericanos, la luz que atraviesa o se dispersa alrededor de la fibra produce un patrón de difracción que puede analizarse para determinar su grosor (Goodman, 2005). Dentro de la óptica, la difracción de Fraunhofer se aplica en condiciones donde la fuente de luz y el plano de observación están suficientemente alejados del objeto, lo que permite que la distribución de intensidad esté directamente relacionada con la geometría de la estructura difractante. Este principio hace posible calcular el grosor de la fibra mediante la ecuación de la difracción para una apertura lineal (Born & Wolf, 1999).

Las fibras de los camélidos sudamericanos (alpaca, llama, vicuña y guanaco) poseen propiedades específicas en cuanto a grosor, elasticidad y resistencia, las cuales dependen de factores como la especie, la zona del vellón de donde se obtiene la fibra, la edad del animal y las condiciones ambientales en las que se desarrolla (Cardozo et al., 2016). El grosor de la fibra es una variable clave en la industria textil, ya que influye directamente en su suavidad, valor comercial y uso en distintos productos. Estudios previos han establecido que el grosor de la fibra de alpaca oscila entre 20 y 32 micras, mientras que la de vicuña puede llegar a ser inferior a 14 micras, lo que la convierte en una de las fibras naturales más finas del mundo (Montes & Palacios, 2018).

A lo largo del tiempo, la determinación del grosor de la fibra de lana ha evolucionado desde métodos rudimentarios hasta técnicas altamente especializadas. Inicialmente, la evaluación se realizaba de forma manual mediante el tacto, lo que hacía que los resultados fueran inciertos y variables. Posteriormente, surgieron métodos ópticos y electrónicos como el microscopio de proyección, que generó impacto entre los años 1927 y 1949 (Quispe et al., 2009), seguido por tecnologías como el Sirolan Laserscan (analizador laser de fibras), el Analizador Óptico de Diámetro de Fibra (OFDA) y el Fiber EC (contador y medidor electrónico de fibras), empleados en diversas instituciones para el análisis de fibras textiles (Aguilar Calla, 2012; Baltuano et al., 2006; Rodríguez Iglesias, 1998). Sin embargo, estos métodos pueden ser costosos y requieren equipos especializados, lo que dificulta su acceso para pequeños productores y criadores de CSA.

Por lo tanto, la difracción óptica en especial la difracción de Fraunhofer (campo lejano) se presenta como una alternativa prometedora dentro de la clasificación de fibra de lana de los CSA en la región de Tacna. El proceso para determinar el grosor de la fibra de manera rápida, precisa y no invasiva la convierte en una herramienta valiosa para productores y la industria textil. Investigaciones recientes han demostrado la eficacia de la difracción de Fraunhofer en la caracterización de fibras naturales (López et al., 2021), cianobacterias (Rosado, 2018) permitiendo mediciones sin contacto directo con la muestra.

Este método representa una solución de menor costo en comparación con las técnicas convencionales, lo que facilitaría su adopción por parte de los productores de CSA. Su implementación permitiría obtener mediciones precisas, así evitando que la fibra sea vendida por debajo de su verdadero valor en el mercado. Esto aseguraría precios más

justos para los criadores, fortaleciendo la comercialización y reduciendo la dependencia de intermediarios que afectan el precio real de la fibra. Se espera que la adopción de la difracción óptica no solo optimice la caracterización del grosor de las fibras animales, sino que también contribuya al desarrollo y fortalecimiento económico de criadores.

2.2. Principio de Huygens-Fresnel

Cada punto en un frente de onda esféricas secundarios, pudiendo supuestamente determinar el progreso del frente de onda o de cualquier porción de ella a través del espacio. En cualquier momento, se supone que la forma del frente de onda es la envolvente de los trenes de ondas secundarios. Este principio, sin embargo, no toma en consideración la mayoría de los trenes de onda secundarios, reteniendo solo la parte común a la envolvente. Como resultado de esta imperfección, el principio de Huygens no puede explicar, por sí mismo, los detalles del proceso de difracción y así lo confirma la experiencia cotidiana.

Sin embargo, el principio de Huygens es independiente de cualquier consideración de longitud de onda, prediciendo las mismas configuraciones de onda en ambas situaciones. El principio de Huygens-Fresnel correspondiente establece que cada punto sin obstrucción de un frente de onda, en un instante de tiempo determinado, sirve como fuente de trenes de onda secundarios esféricos (de la misma frecuencia que la onda primaria). La amplitud del campo óptico en cualquier punto más allá es la superposición de todos estos trenes de onda (considerando sus amplitudes y fases relativas).

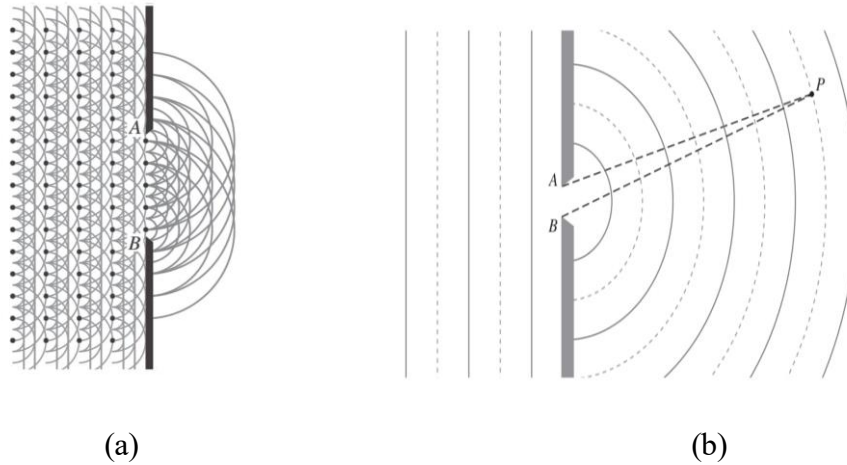


Figura 1

Difracción en una abertura pequeña.

a) Ondículas de Huygens, b) Imagen de onda clásica

Nota: Tomado del libro (Hecht, 2017)

Por lo tanto, si la longitud de onda es grande comparada con la abertura, las ondas se extenderán según ángulos grandes en la región más allá de la obstrucción. Cuanto más pequeña sea la abertura, más circulares serán las ondas difractadas.

2.3. Difracción

El trabajo de Franceschi Grimaldi en el siglo XVII fue el primer estudio detallado que se publicó sobre esta desviación de la luz de su propagación rectilínea, a la que denominó *diffractio*. El efecto es una característica general de los fenómenos ondulatorios que ocurren donde quiera que una parte de un frente de onda ya sea sonido, onda material o luz, este obstruida de alguna manera (Hecht, 2000).

2.3.1. Varios Osciladores coherentes

Si la extensión espacial de conjunto es comparativamente pequeña, las amplitudes de onda individuales que lleguen a la pantalla serán esencialmente iguales habiendo recorrido casi las mismas distancias, esto es:

$$E_0(r_1) = E_0(r_2) = \dots = E_0(r_N) = E_0(r) \quad (1)$$

La suma de los trenes de onda esféricos interferentes produce un campo eléctrico proporcionado por la parte real de

$$\tilde{E} = E_0(r)e^{i(kr_1 - \omega t)} + E_0(r)e^{i(kr_2 - \omega t)} + \dots + E_0(r)e^{i(kr_N - \omega t)} \quad (2)$$

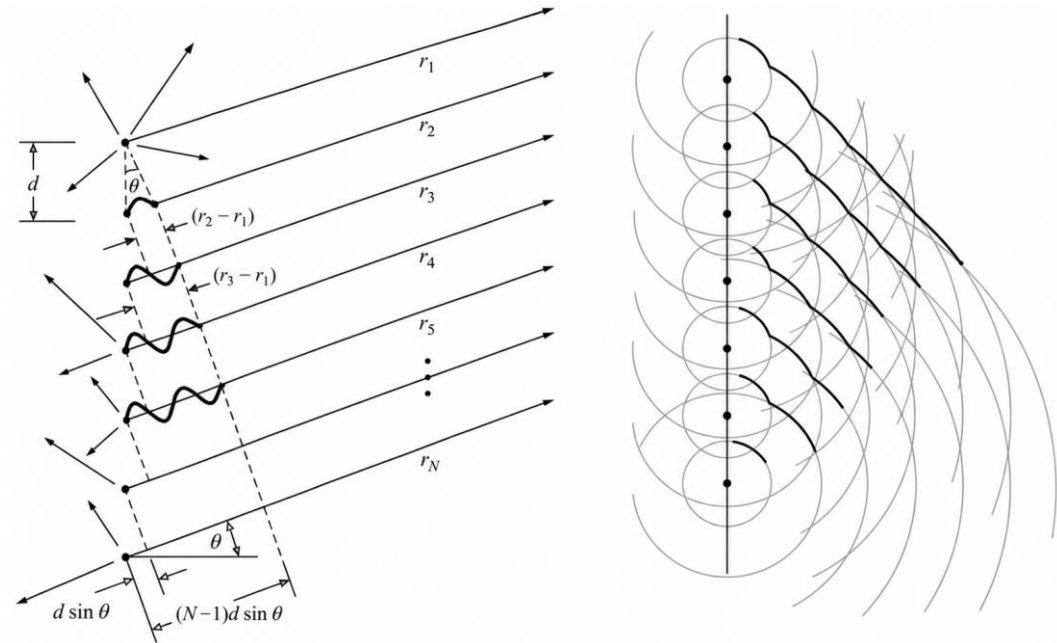


Figura 2

Representación de frentes de onda emitidos por osciladores coherentes.

- a) Angulo mostrado $\delta = \pi$ mientras que en $\theta = 0$, δ seria cero, (b) Una de las muchas series de frentes de onda emitidos por una línea de fuentes.

Nota: Tomada del libro (Hecht, 2000)

Sin tomar en cuenta su naturaleza vectorial del campo eléctrico para esta configuración.

$$\tilde{E} = E_0(r)e^{-i\omega t}e^{ikr_1} * [1 + e^{ik(r_2-r_1)} + e^{ik(r_2-r_1)} + \dots + e^{ik(r_N-r_1)}] \quad (3)$$

La diferencia de fase entre fuentes adyacentes se obtiene de la expresión $\delta = k_0\Lambda$, puesto que $\Lambda = nd \sin \theta$, en un medio con índice n, $\delta = kd \sin \theta$.

Utilizando la figura 2, se deduce que, $\delta = k(r_2 - r_1)$, $2\delta = k(r_3 - r_1)$, etc.

Entonces, el campo en P puede escribirse como

$$\tilde{E} = E_0(r)e^{-i\omega t}e^{ikr_1} * [1 + (e^{i\delta}) + [(e^{i\delta}) + (e^{i\delta}) + \dots + (e^{i\delta})^N] \quad (4)$$

La serie geométrica entre paréntesis tienes

$$\frac{(e^{i\delta N} - 1)}{(e^{i\delta} - 1)} \quad (5)$$

Que puede ordenarse así:

$$\frac{e^{\frac{iN\delta}{2}} \left[e^{\frac{iN\delta}{2}} - e^{-\frac{iN\delta}{2}} \right]}{e^{\frac{i\delta}{2}} \left[e^{\frac{i\delta}{2}} - e^{-\frac{i\delta}{2}} \right]} \quad (6)$$

O de otra manera

$$e^{\frac{i(N-1)\delta}{2}} \left(\frac{\sin \frac{N\delta}{2}}{\sin \frac{\delta}{2}} \right) \quad (7)$$

Entonces el campo se transforma en

$$\tilde{E} = E_0(r) e^{-i\omega t} e^{i[kr_1 + \frac{(N-1)\delta}{2}]} \left(\frac{\sin \frac{N\delta}{2}}{\sin \frac{\delta}{2}} \right) \quad (8)$$

Definimos R como la distancia desde el centro de la línea de los osciladores hasta el punto P , es decir

$$R = \frac{1}{2}(N-1)d \sin \theta + r_1 \quad (9)$$

Por lo tanto

$$\tilde{E} = E_0(r) e^{i(kR - \omega t)} \left(\frac{\sin \frac{N\delta}{2}}{\sin \frac{\delta}{2}} \right) \quad (10)$$

La distribución de densidad de flujo dentro de la distribución de difracción debida a N fuentes puntuales distantes idénticas y coherentes es una disposición lineal, es proporcional al producto del campo complejo E y su conjugado $I \propto E.E^*/2$ donde E es el campo eléctrico complejo y sus conjugado.

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \left(\frac{N\delta}{2} \right)}{\sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right)} \quad (11)$$

2.3.2. Difracción de una sola rendija

La difracción es un fenómeno óptico fundamental que ocurre cuando una onda luminosa encuentra un obstáculo o una abertura, generando un patrón característico debido a la interferencia de las ondas secundarias. De acuerdo con el principio de Huygens, cada punto en un frente de onda actúa como una fuente de ondas esféricas

secundarias, lo que permite explicar la propagación de la luz y la formación de patrones de difracción.

Cuando una onda plana incide sobre una rendija estrecha, en lugar de proyectar una sombra con bordes bien definidos, se observa una distribución de intensidad con regiones de luz y oscuridad debido a la interferencia de las ondas difractadas. Este fenómeno se ilustra en la Figura 3.

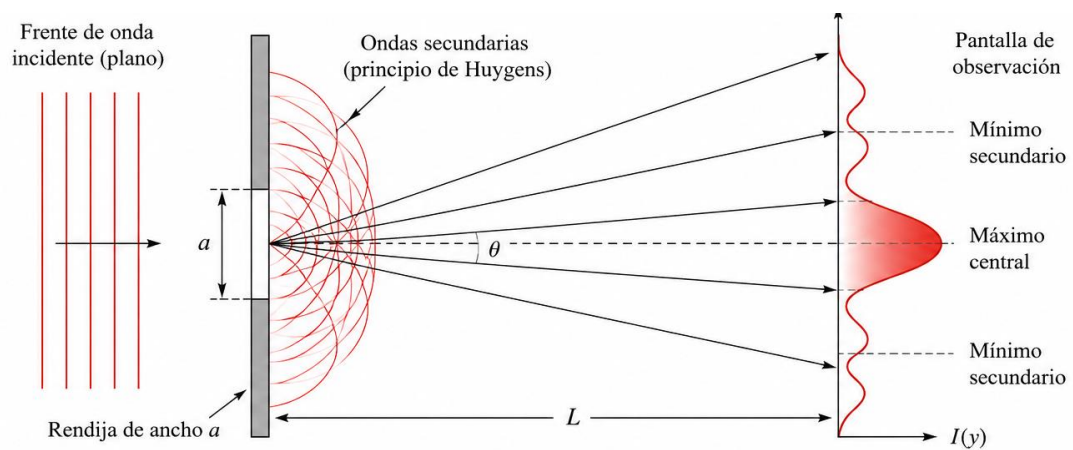


Figura 3

Esquema de la difracción de una sola rendija y distribución de intensidad.

Nota: Elaboración propia adaptada del libro (Hecht, 2000)

De manera similar, si la luz atraviesa un pequeño agujero, en lugar de propagarse en línea recta, emerge como una onda esférica centrada en la apertura, lo que constituye una demostración experimental del principio de Huygens.

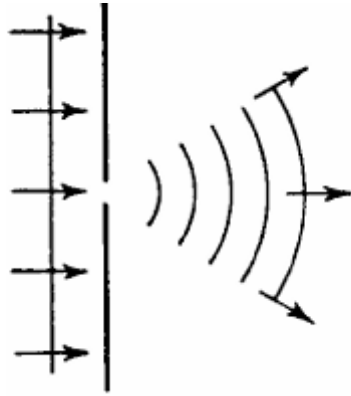


Figura 4

Propagación de luz a través de una abertura pequeña.

Nota: La imagen fue tomada del libro (Gasvik, 2002).

Este principio permite calcular la distribución de intensidad del patrón de difracción generado por una rendija, lo cual resulta fundamental para la caracterización de estructuras delgadas, como las fibras de lana de los camélidos

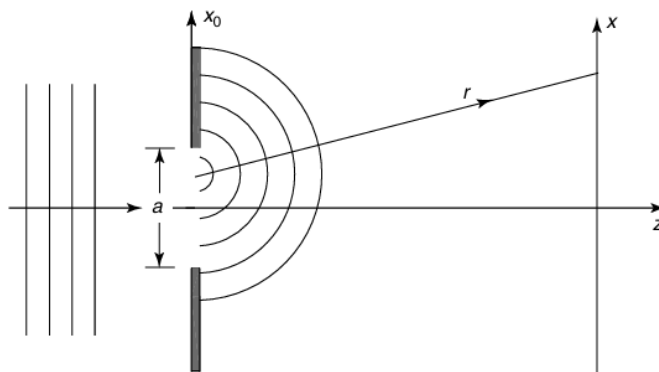


Figura 5

Representación del modelo unidimensional de difracción de una rendija.

Nota: La imagen fue tomada del libro (Gasvik, 2002)

Si la rendija es lo suficientemente larga en la dirección y_0 , el problema puede considerarse unidimensional en la dirección x_0 . Al incidir una onda plana perpendicularmente sobre la rendija, cada punto dentro de ella actúa como una fuente de ondas secundarias. El campo en un punto x debido a un punto arbitrario x_0 dentro de la rendija se modela como una onda esférica con su centro en x_0 , cuya contribución está dada por la ecuación

$$\Delta u(x) = \frac{e^{ikr}}{r}$$

donde k es el número de onda y r la distancia entre la fuente secundaria y el punto de observación. Este principio es la base para calcular la distribución de intensidad del patrón de difracción en la pantalla de observación.

2.3.3. Difracción de Fraunhofer:

Según el principio de Huygens-Fresnel presentado por Hecht (2000, ec. 10), cada punto de la abertura actúa como una fuente secundaria de ondas esféricas.

$$E = \varepsilon_L \int_{-\frac{D}{2}}^{+\frac{D}{2}} \frac{\text{sen}(wt - kr)}{r} dy \quad (12)$$

donde, D representa el ancho de la franja opaca y ε_L es la amplitud de la fuente luminosa. Para el punto de observación, se cumple que $R \gg D$. Así, para $r(y)$, puede considerarse un valor medio R , de modo que:

$$dE = \frac{\varepsilon_L}{R} \text{sen}(wt - kR) dy \quad (13)$$

donde $(\varepsilon_L/R)dy$, es la amplitud diferencial de la onda. El valor de r puede expresarse como una expansión:

$$r = R - y \operatorname{sen} \theta + \left(\frac{y^2}{2R} \right) \cos^2 \theta + \dots \quad (14)$$

donde θ es el ángulo de difracción, medido desde el eje óptico.

Sustituyendo en (12):

$$E = \frac{\varepsilon_L}{R} \int_{-\frac{D}{2}}^{+\frac{D}{2}} \operatorname{sen} [wt - k(R - y \operatorname{sen} \theta)] dy \quad (15)$$

Integrando, se obtiene:

$$E = \frac{\varepsilon_L}{R} \frac{\sin\left(\frac{kD}{2}\right)}{\left(\frac{kD}{2}\right) \operatorname{sen} \theta} \operatorname{sen}(wt - kR) \quad (16)$$

Definiendo el parámetro:

$$\beta = \left(\frac{kD}{2} \right) \operatorname{sen} \theta = \frac{\pi D \operatorname{sen} \theta}{\lambda} \quad (17)$$

Donde: D es el tamaño del objeto (grosor de la fibra), λ es la longitud de onda de la luz utilizada.

Entonces, el campo eléctrico puede escribirse como:

$$E = \frac{\varepsilon_L D}{R} \frac{\sin(\beta)}{\beta} \sin(wt - kR) \quad (18)$$

La magnitud que se mide experimentalmente es la irradiancia, dada por:

$$I(\theta) = \langle E^2 \rangle_T \quad (19)$$

Promediando temporalmente Donde $\langle \sin(wt - kR) \rangle_T = 1/2$, resulta:

$$I(\theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_L D}{R} \right)^2 \left(\frac{\sin(\beta)}{\beta} \right)^2 \quad (20)$$

cuando $\theta = 0$, se cumple que $\sin(\beta)/\beta = 1$, y la intensidad alcanza su valor máximo $I(0)$.

Por tanto:

$$I(\theta) = I(0) \left(\frac{\sin(\beta)}{\beta} \right)^2 \quad (21)$$

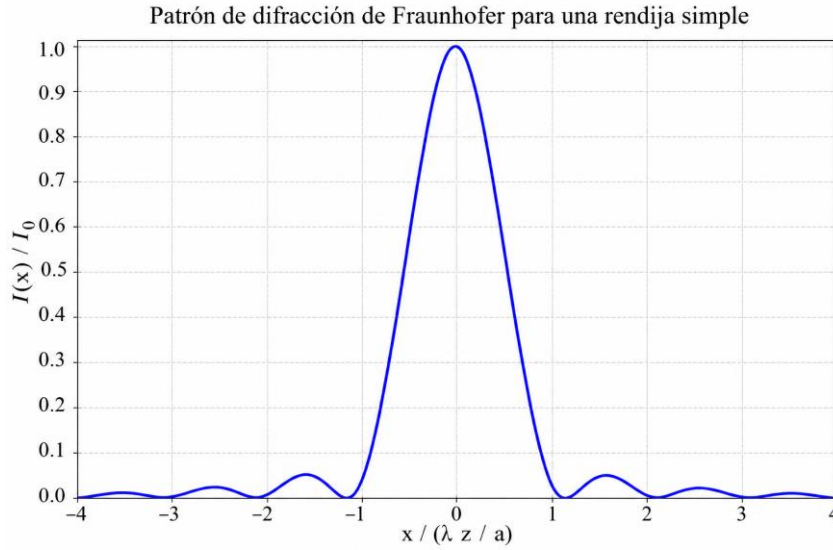


Figura 6

Gráfico del patrón de difracción de Fraunhofer para una ranura

Nota: La imagen generada por el autor en Matlab

Donde el parámetro de la ecuación 17 describe la fase relativa entre los puntos provenientes de distintos puntos de la rendija. Los mínimos de intensidad ocurren cuando el numerados de la función seno se anula, excepto en el punto central $\beta = 0$, donde la intensidad es máxima.

Entonces la condición de los mínimos es:

$$\sin \beta = 0 \Rightarrow \beta = m\pi$$

Donde $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Sustituyendo la definición de β :

$$\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta_m = m\pi$$

Simplificando:

$$D \sin \theta_m = m\lambda \quad (22)$$

Donde D representa el grosor de la fibra, el cual es el valor por estimar.

2.3.4. Difracción de Fresnel

A medida que el punto de observación se aleja en la dirección z , la imagen de la abertura, aunque todavía fácilmente reconocible, va adquiriendo mayor estructura conforme las franjas de difracción se hacen más prominentes. Este fenómeno se denomina difracción de Fresnel o difracción de campo cercano.

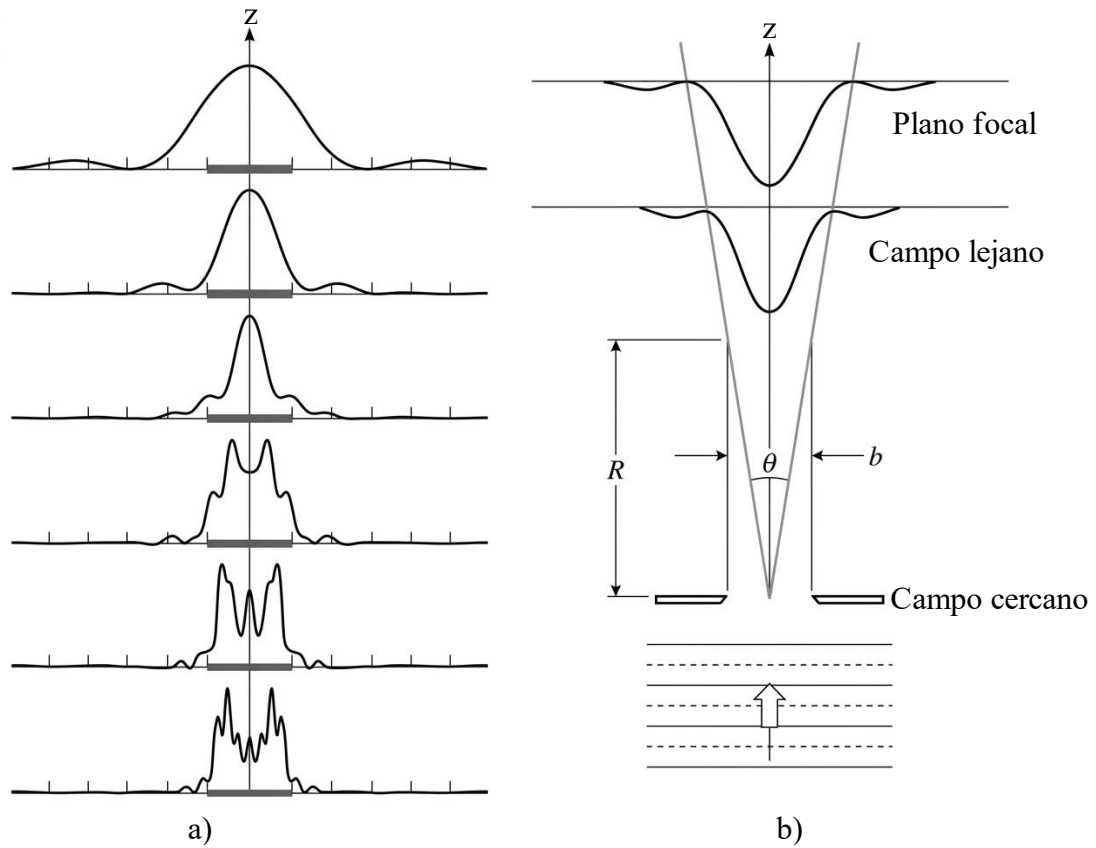


Figura 7

Transición de la difracción de Fresnel al de Fraunhofer en una rendija simple.

a) Patrones de difracción a diferentes distancias y b) Condición de aproximación de Fraunhofer.

Nota: Elaboración Propia (Hecht, 2000)

Una sucesión de patrones de difracción a distancias crecientes muestra la evolución desde el régimen de Fresnel, en la región cercana, hacia el régimen de Fraunhofer, en campo lejano. La banda gris representa el ancho de la rendija (ver figura 7a).

Si el plano de observación continúa alejándose, se produce un cambio progresivo en la distribución de intensidad. A grandes distancias z , la figura de difracción se

extiende considerablemente y pierde similitud con la abertura original. En este régimen, conocido como difracción de Fraunhofer o campo lejano, el aumento de la distancia solo modifica el tamaño de la distribución, manteniendo inalterada su forma.

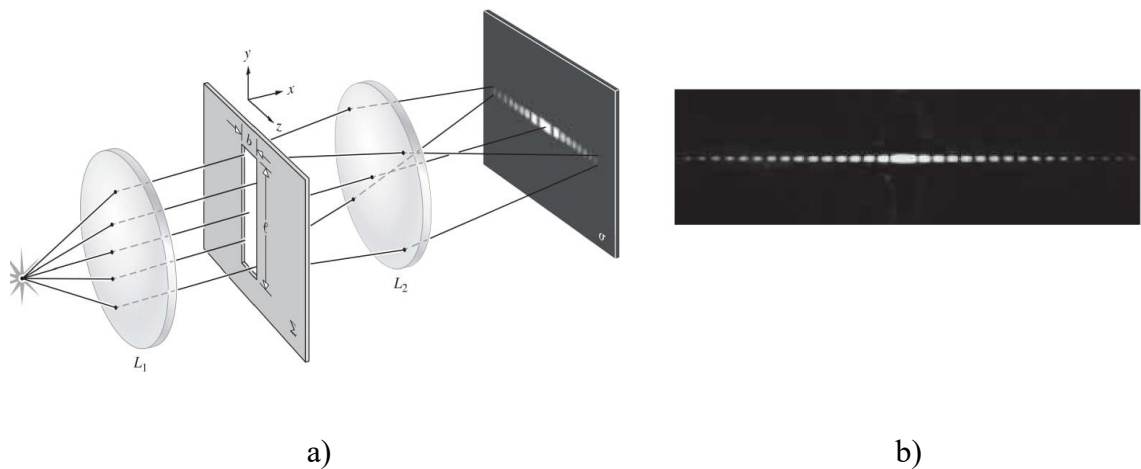


Figura 8

Patrón de difracción de Fraunhofer producido por una rendija simple.

a) Difracción de Fraunhofer por una sola rendija simple y b) su distribución de intensidad con fuente puntual

Nota: La imagen fue tomada del libro (Hecht, 2000)

2.4. Camélidos sudamericanos

Los camélidos sudamericanos alpaca (*Vicugna pacos*), llama (*Lama glama*), vicuña (*Vicugna vicugna*) y guanaco (*Lama guanicoe*) constituyen una fuente importante de fibras textiles naturales de alto valor económico y científico. Estas fibras se caracterizan por su estructura queratínica y por presentar una amplia variabilidad en sus propiedades físicas, siendo el grosor de la fibra uno de los parámetros más relevantes para su caracterización y clasificación textil (Quispe et al., 2009; Rodríguez Iglesias, 1998).

El grosor de la fibra influye directamente en propiedades como la suavidad, resistencia, elasticidad y aptitud para el procesamiento industrial, por lo que su determinación precisa es fundamental tanto en estudios productivos como en investigaciones físicas orientadas a la caracterización del grosor de la fibra (Carrera Gallissá, 2017; Islas Cortés et al., 2019).

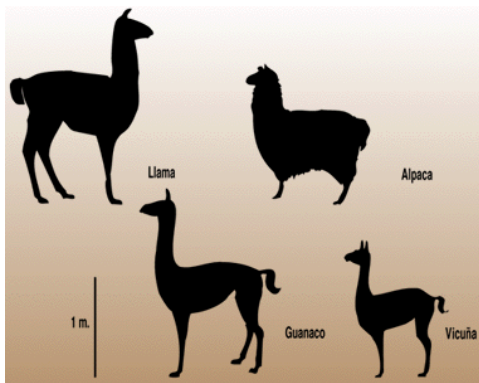


Figura 9

Camélidos sudamericanos

Nota: Mamíferos chilenos (Rottmann, 1975)

2.4.1. Alpaca

La fibra de alpaca es una de las más estudiadas y utilizadas a nivel industrial debido a su combinación de grosor, resistencia y diversidad cromática. Su grosor varía en función de factores genéticos, ambientales y de manejo, lo que genera una dispersión significativa en los valores reportados (Meza Núñez, 2018; Paitan Quispe, 2019). Diversos estudios realizados en el Perú reportan su grosor promedio oscilan entre valores finos y medios, lo que posiciona a la alpaca como una fibra competitiva frente a otras fibras animales a nivel internacional (Quispe et al., 2009). La

caracterización física de esta fibra resulta esencial para evaluar su calidad y potencial productivo, siendo el diámetro uno de los indicadores más empleados.



Figura 10

Fotografía de una Alpaca en Riso Park Pachia

Nota: Elaboración propia, 2025

2.4.2. Llama

La fibra de llama presenta, en general, grosores mayores que la fibra de alpaca, lo que limita su uso en prendas finas, pero la hace adecuada para aplicaciones textiles más rústicas y técnicas. Su estructura muestra una mayor heterogeneidad, con presencia variable de fibras con núcleo central, lo cual influye en su comportamiento mecánico y térmico (Quispe et al., 2009).

El estudio del grosor de la fibra de llama permite establecer criterios de clasificación y uso, además de servir como referencia comparativa en investigaciones que abarcan diferentes especies de camélidos sudamericanos.



Figura 11

Fotografía de una Llama en Riso Park Pachia

Nota: Elaboración propia, 2025

2.4.3. Vicuña

La vicuña produce una de las fibras naturales más finas del mundo, siendo altamente valorada en el mercado textil internacional. Su reducido grosor confiere a la fibra una suavidad excepcional, lo que justifica su elevado valor económico y la necesidad de métodos de medición preciso (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2005; Quispe et al., 2009) s.

Desde el punto de vista físico, la medición del grosor de la fibra de vicuña representa un desafío experimental debido a su escala micrométrica, lo que hace especialmente pertinente el uso de técnicas ópticas no destructivas, como la difracción óptica.



Figura 12

Fotografía de una Vicuña en ruta de Caravelí con Moquegua

Nota: Elaboración propia, 2026.

2.4.4. Guanaco

La fibra de guanaco, aunque menos explotada comercialmente que la de alpaca o vicuña, presenta propiedades físicas de interés, con diámetros intermedios entre ambas especies. Estudios realizados por organismos científicos destacan su potencial como recurso sustentable, especialmente en regiones donde el guanaco es una especie nativa (CONICET, 2012).

La caracterización del grosor de esta fibra contribuye al conocimiento integral de los camélidos sudamericanos y permite ampliar la base de datos comparativa necesaria para estudios físicos y tecnológicos.



Figura 13

Fotografía de 03 Guanacos en la región de Tacna

Nota: (Revista Agroperú, 2024).

2.5. Industria textil de fibras de Camélidos

El grosor es uno de los principales parámetros para evaluar la calidad de las fibras textiles naturales, pues influye en su suavidad, resistencia, flexibilidad, aislamiento térmico, interacción con la luz y comportamiento mecánico (Islas Cortés et al., 2019; Rodríguez Iglesias, 1998).

En fibras de alpaca, llama y vicuña, constituye un criterio fundamental para su clasificación y valoración comercial, ya que una mayor finura suele asociarse con mejor calidad. En esta investigación, el grosor se caracterizó mediante difracción óptica de Fraunhofer, técnica que relaciona el patrón generado por la interacción del haz láser con la fibra y su diámetro, constituyendo una alternativa no destructiva para caracterizar fibras textiles naturales.

III. METODOLOGÍA.

3.1. Materiales y equipos

Se implementó un sistema experimental basado en el fenómeno de difracción de Fraunhofer para la determinación del diámetro de fibras de camélidos sudamericanos (CSA). El principio físico utilizado se fundamenta en la teoría de difracción en campo lejano, donde un obstáculo delgado como una fibra genera un patrón de intensidad cuya distribución angular depende directamente de su grosor (Hecht, 2017). El arreglo experimental estuvo compuesto por:

3.1.1. Lista de materiales

- 01 Fuente laser verde ($\lambda = 532nm$, $10mW$)
- 03 soportes
- 01 postes
- 60 porta muestras
- 01 pantalla blanca de observación
- 01 wincha

3.1.2. Lista de equipos y/o instrumento

- 01 Mesa óptica anti vibratoria
- 01 cámara CMOS monocromática digital de alta resolución
- 01 computadora portátil

3.1.3. Lista de muestras

- 20 fibras de Alpaca
- 20 fibras de Llama

- 20 fibras de Vicuña

3.1.4. Lista de software

- Software Matlab
- Excel

3.2. Proceso de desarrollo de investigación

3.2.1. Implementación del sistema experimental de difracción óptica.

El montaje experimental consistió en un sistema de difracción en configuración de campo lejano (Fraunhofer). El láser fue alineado de manera perpendicular a la fibra, la cual actuó como obstáculo difractor. La luz transmitida generó un patrón de difracción proyectado sobre una pantalla ubicada a una distancia fija 1.89 m . La distancia entre la fibra y la pantalla fue medida cuidadosamente, manteniéndose constante durante todos los ensayos experimentales. La cámara fue colocada frente a la pantalla para registrar los patrones de difracción generados.

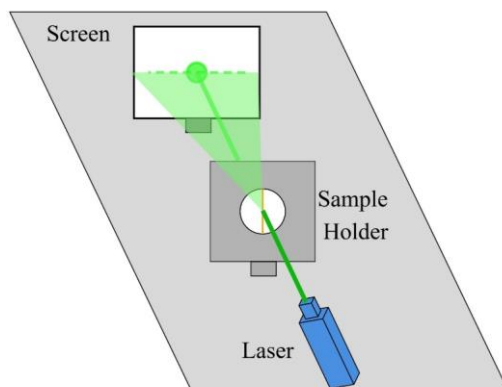


Figura 14

Montaje experimental para la difracción de Fraunhofer.

Nota: Elaboración propia.

Para implementar el caracterizador de grosor de fibra de lana, se realizaron los siguientes procedimientos:

En la mesa óptica del laboratorio de Óptica del proyecto “Determinación de la morfología de partes del cuerpo humano mediante proyección de franjas para aplicaciones médicas”, en la cual se implementó el caracterizador con unos soportes de material de plástico de impresiones 3D, en un carril, laser y porta muestras. Asimismo, se implementó el láser $532nm$ a corriente alterna, Camara celular monocromática y pantalla blanca del proyecto de investigación, la cual se utilizará para la caracterización del grosor de la fibra de lana. Se consiguió fibras de lana previamente esquilados por lo mismo pobladores de las comunidades altoandinas, la cual serán caracterizados su grosor se seleccionará una fibra individual de alpaca, llama, guanaco o vicuña, y se fijará en el porta muestras evitando tensión excesiva. Se ajustaron las distancias necesarias para garantizar la correcta formación del patrón de difracción del caracterizador de grosor.

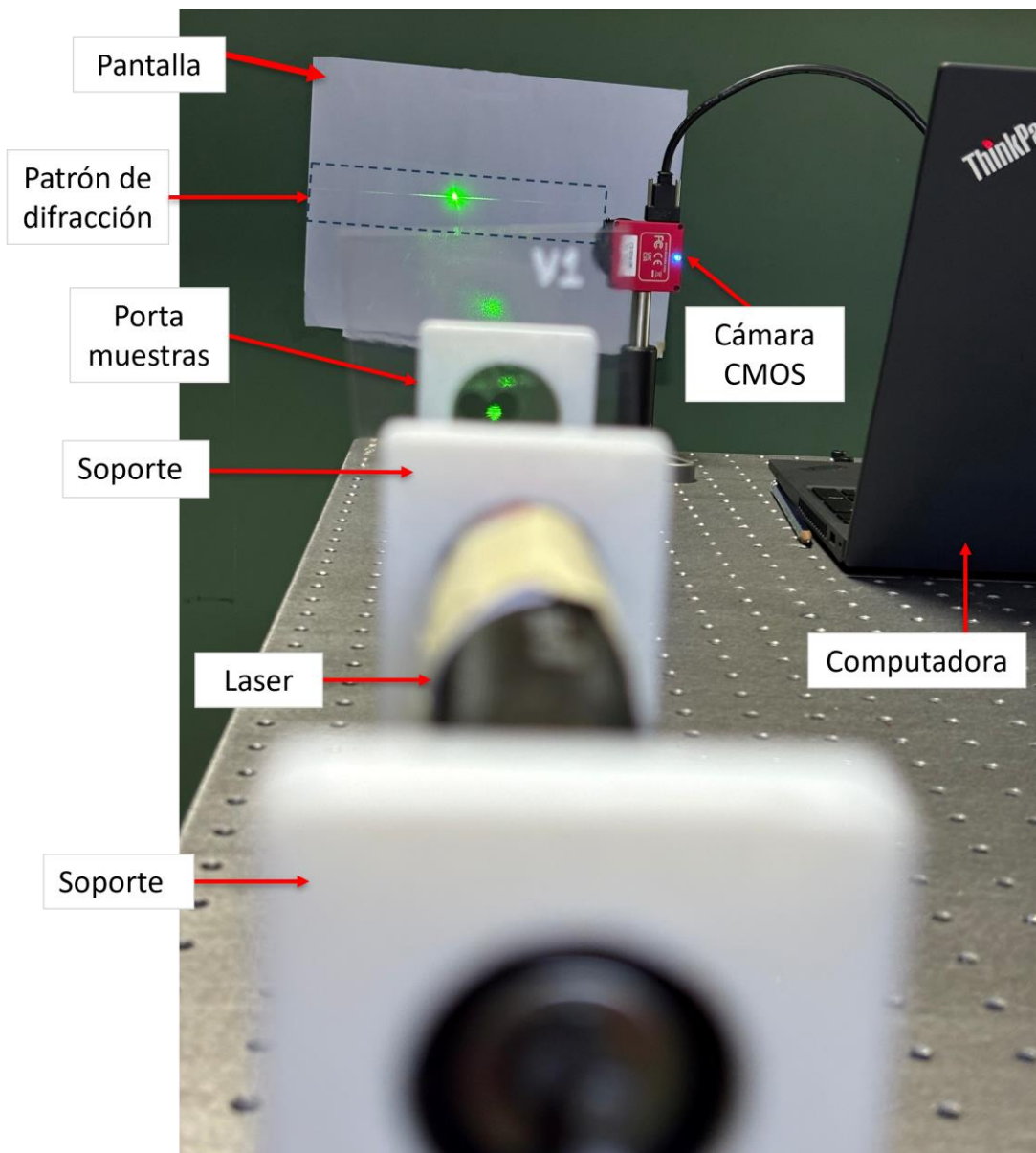


Figura 15

Diagrama del arreglo experimental de difracción de Fraunhofer

Fotografía del montaje experimental con los componentes fijados sobre una mesa óptica aislada de vibraciones Thorlabs, modelo B90120L.

Nota: Elaboración propia.

3.2.2. Medición de las fibras de lana de los camélidos sudamericanos

3.2.2.1. Preparación de muestras

Las fibras de lana de alpaca, llama, vicuña y guanaco fueron obtenidas de comunidades altoandinas del sur del Perú, previamente esquiladas bajo condiciones tradicionales. Para cada especie (alpaca, llama y vicuña) se seleccionaron veinte (20) fibras individuales, constituyendo un total de sesenta (60) muestras analizadas. La selección se realizó considerando las fibras integrales, sin dañar la fibra, lo cual representa el aspecto propio de cada camélido, con el fin de asegurar resultados confiables.

Cada fibra fue fijada cuidadosamente en el porta muestras, cuidando que este lo más recta posible. Se evitó aplicar tensión excesiva para prevenir deformaciones o ruptura, así como una fijación demasiado laxa que pudiera generar patrones de difracción dobles o distorsionados.

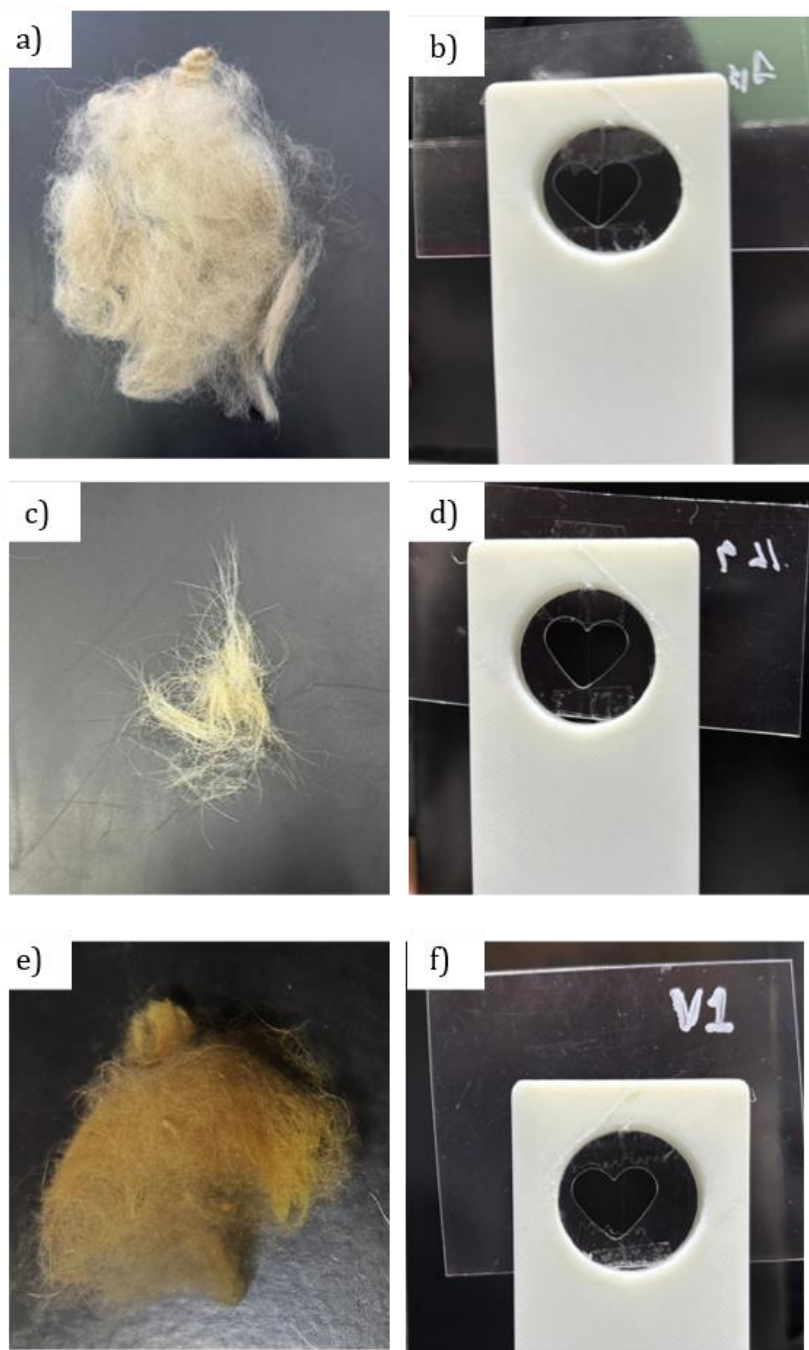


Figura 16

Fotografía de muestras

a) Mechón de alpaca, b) fibra de alpaca, c) Mechón de llama, d) fibra de llama, e) Mechón de vicuña, f) fibra de Vicuña.

Nota: Elaboración propia

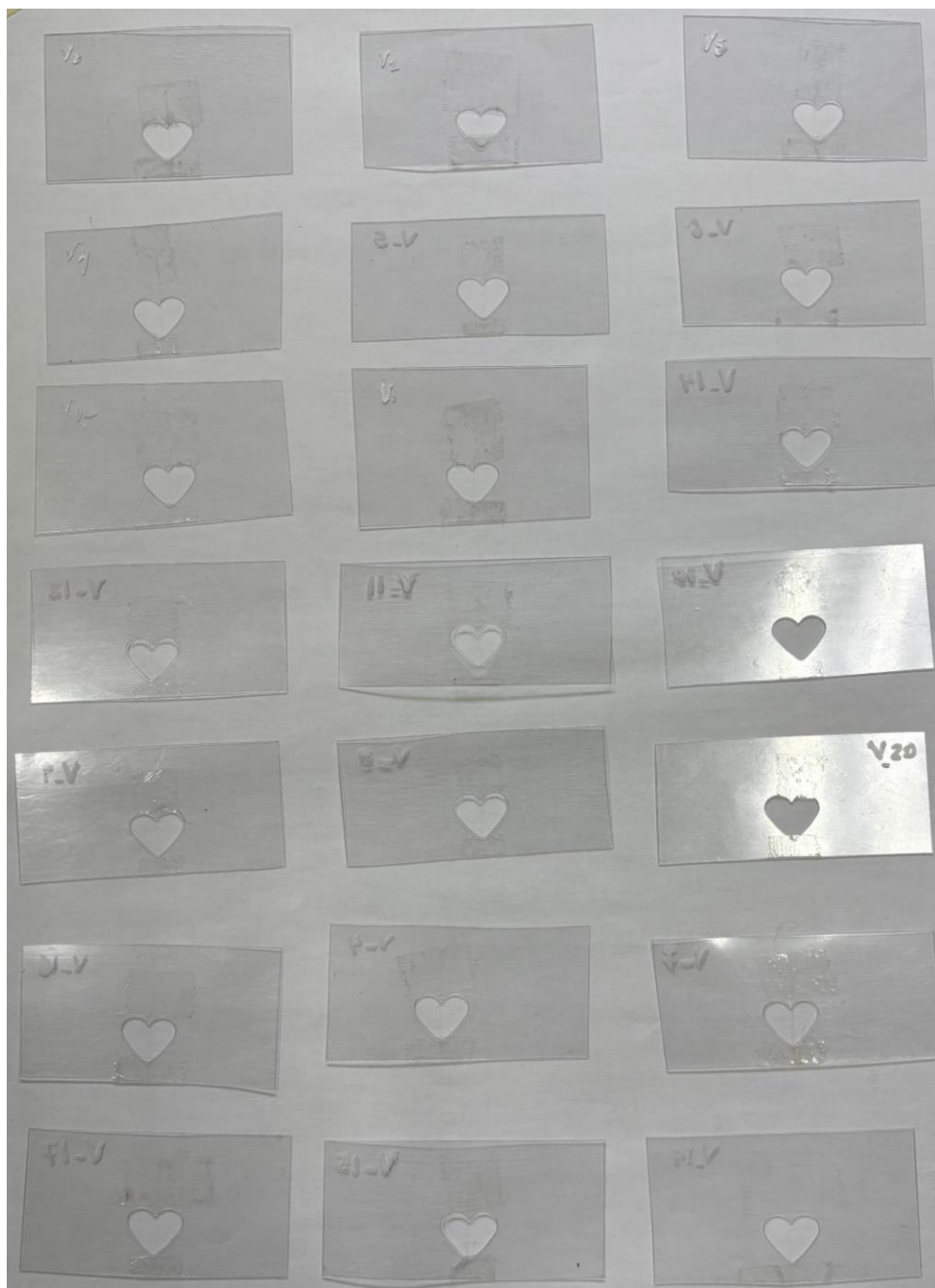


Figura 17

Preparación de muestras de fibra de vicuña.

Nota: Elaboración propia



Figura 18

Preparación de muestras de fibra de llama

Nota: Elaboración propia



Figura 19

Preparación de muestras de fibra de alpaca

Nota: Elaboración propia.

3.2.2.3. Generación del patrón de difracción

Para generar el patrón de difracción, utilizó una fuente láser de onda $\lambda = 532 \text{ nm}$ y potencia 10 mW, la cual incidió sobre una muestra de fibra de lana de camélidos sudamericano. La fibra fue fijada en un porta muestras e insertada dentro de soporte. La luz que bordea la fibra forma un patrón de difracción sobre una pantalla blanca que está a una distancia de 189 cm. El patrón de difracción es adquirido por una cámara celular de buena resolución. Se trabaja el procedimiento para el conjunto de muestras (20 fibras por especie), manteniendo constantes las condiciones de adquisición.

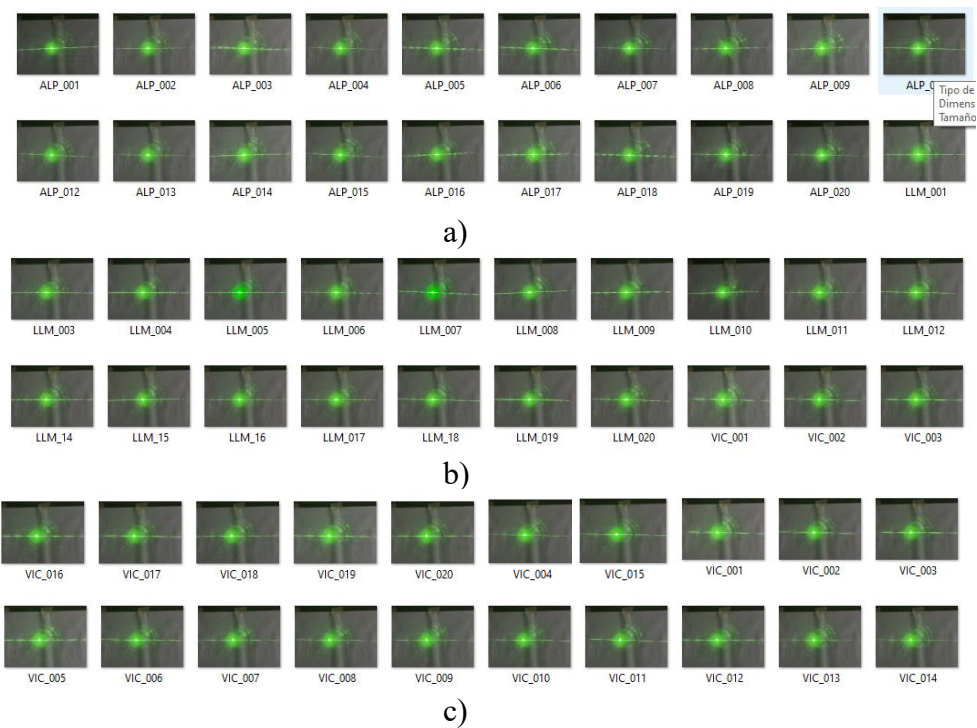


Figura 20

Patrones de difracción de 60 muestras,

a) 20 fibras de alpaca, b) 20 fibras de llama y c) 20 fibras de vicuña.

Nota: Elaboración propia

Las condiciones de adquisición (distancia, potencia del láser y configuración de la cámara) se mantuvieron constantes para todas las muestras con el fin de garantizar reproducibilidad experimental.

3.2.2.4. Caracterización del grosor de fibra

Las imágenes obtenidas de las fibras de los camélidos sudamericanos fueron posteriormente procesadas mediante una rutina desarrollada en MATLAB, lo que permitió calcular el grosor de cada fibra a partir de los patrones de difracción registrados (la rutina se encuentra en el Anexo 2).

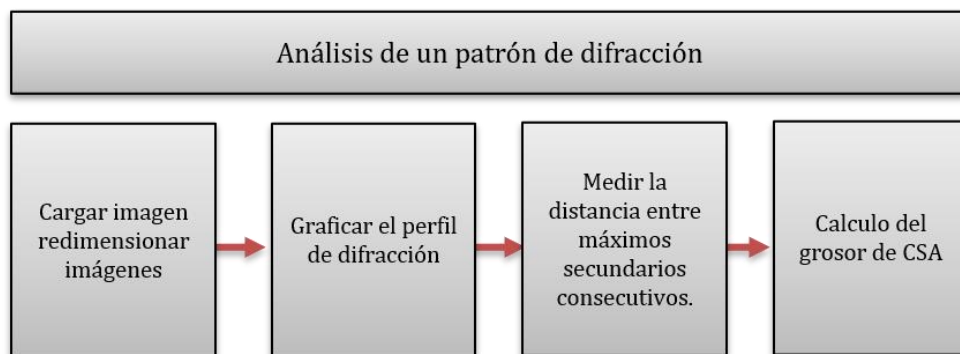


Figura 21

Rutina en Matlab

Nota: Elaboración propia

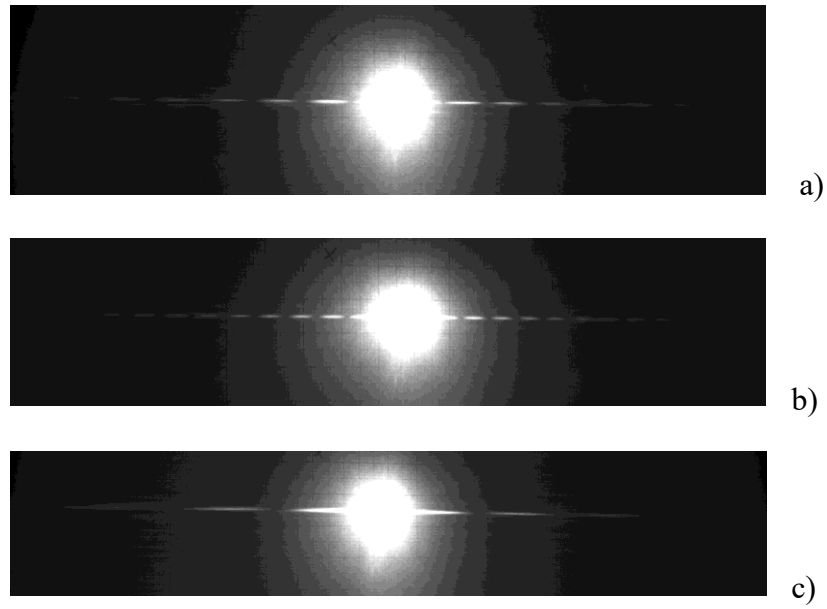


Figura 22

Patrón de difracción RGB – Matlab

a) Alpaca, b) Llama y c) Vicuña

Nota: Elaboración propia

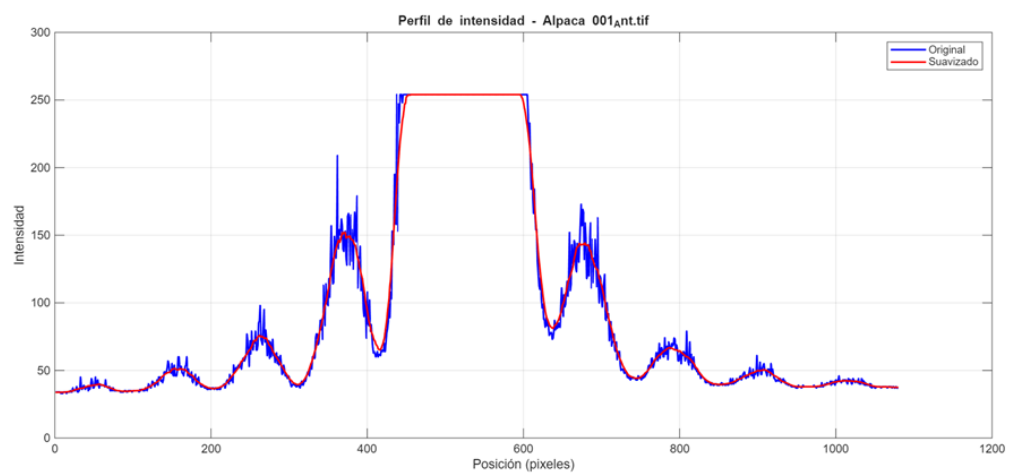


Figura 23

Patrón de intensidad

Nota: Patrón de intensidad de una fibra de alpaca.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Medidor de fibras implementado

Para la medición del grosor de las fibras de camélidos sudamericanos se implementó un sistema óptico basado en la difracción de Fraunhofer. El arreglo experimental estuvo conformado por una fuente láser de longitud de onda de 532nm, un soporte para posicionar las fibras, una pantalla de proyección y un sistema de captura de imágenes mediante una cámara celular.

Durante el desarrollo experimental, las fibras fueron colocadas perpendicularmente a la trayectoria del haz láser, permitiendo la formación de patrones de difracción sobre la pantalla. Los patrones observados presentan un máximo central intenso acompañado de franjas laterales distribuidas de manera simétrica. La distancia entre la fibra y la pantalla de observación fue ajustada para asegurar el campo lejano de la difracción de Fraunhofer. La distancia con que se trabajó fue de 189 cm (considerando desde el porta muestras hacia la pantalla), lo que permitió obtener patrones bien definidos y consistentes con la literatura.

Además, se observó que la separación entre las franjas cambia de acuerdo con el grosor de la fibra analizada. Las fibras más delgadas generan una mayor separación entre franjas, mientras que las fibras de mayor grosor producen patrones más compactos. Este comportamiento coincide con lo descrito en estudios relacionados con difracción Fraunhofer aplicada a las fibras (Hecht, 2017). Las imágenes obtenidas fueron procesadas posteriormente utilizando el software MATLAB, lo que permitió determinar

experimentalmente el grosor de las fibras mediante el análisis de los mínimos de difracción.

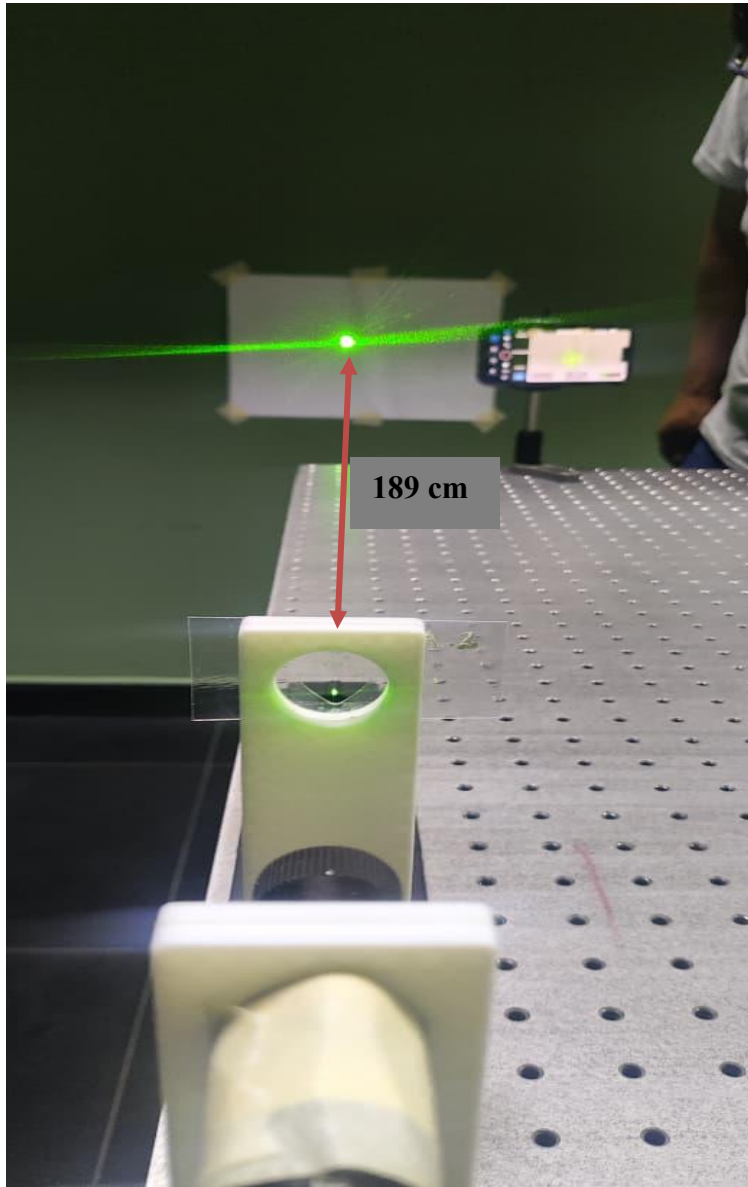


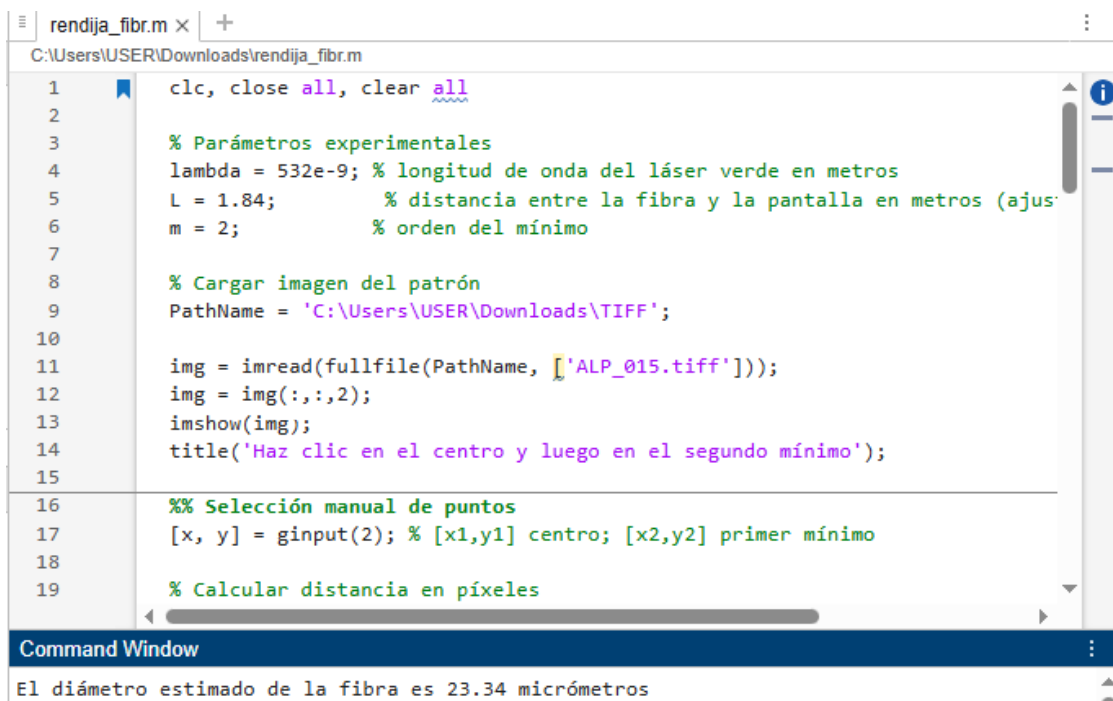
Figura 24

Distancia de la muestra hacia la pantalla.

Nota: Elaboración propia.

4.2. Grosos de fibra de CSA

A partir del análisis de los patrones de difracción obtenidos experimentalmente, fue posible determinar el grosor de las fibras de alpaca, llama y vicuña utilizando el modelo de difracción de Fraunhofer. Los resultados obtenidos muestran diferencias en el grosor promedio entre las especies analizadas, reflejando características propias de cada tipo de fibra. Asimismo, se observó que algunas fibras presentan mayor uniformidad en su grosor, mientras que otras muestran una mayor variación entre muestras.



```

rendija_fibr.m
C:\Users\USER\Downloads\rendija_fibr.m
1  clc, close all, clear all
2
3  % Parámetros experimentales
4  lambda = 532e-9; % longitud de onda del láser verde en metros
5  L = 1.84;        % distancia entre la fibra y la pantalla en metros (ajus
6  m = 2;          % orden del mínimo
7
8  % Cargar imagen del patrón
9  PathName = 'C:\Users\USER\Downloads\TIFF';
10
11  img = imread(fullfile(PathName, ['ALP_015.tiff']));
12  img = img(:,:,2);
13  imshow(img);
14  title('Haz clic en el centro y luego en el segundo mínimo');
15
16  %% Selección manual de puntos
17  [x, y] = ginput(2); % [x1,y1] centro; [x2,y2] primer mínimo
18
19  % Calcular distancia en píxeles

```

Command Window

El diámetro estimado de la fibra es 23.34 micrómetros

Figura 25

Captura de pantalla de programación en Matlab para estimar el grosor de una fibra de alpaca.

Nota: Elaboración propia.

4.2.1 Fibra de Alpaca

Las fibras de alpaca presentaron grosores comprendidos entre 18.53 μm y 37.93 μm tal como se muestra en la **Tabla 3**, obteniéndose el grosor de 26.53 ± 1.12 μm . Asimismo, el coeficiente de variación calculado fue de 18.85%, indicando una dispersión moderada entre las muestras analizadas. Estos valores se encuentran dentro de los rangos reportados por los investigadores para fibras de alpaca (19.48 – 25.5 μm) (Apaza Zúñiga y Quispe Coaquira, 2020; Quispe et al., 2023), lo que se evidencia una concordancia con el valor teórico.

4.2.2. Llama

Las fibras de llama presentaron un grosor entre 23.34 μm y 67.44 μm , tal como se muestra en la **Tabla 4**, obteniéndose el grosor de 37.39 ± 2.95 μm . El coeficiente de variación fue de 35.31%, superior al rango 20 - 25% reportado en la literatura. En comparación con lo reportado por Quispe-Ccasa et al. (2020), quienes señalan para valores de 20 - 23 μm en hembras jóvenes y de 25–27 μm en machos y animales mayores, los resultados obtenidos reflejan la variabilidad natural asociada a diferencias individuales, la zona del vellón y las condiciones de crianza.

4.2.3. Vicuña

Las fibras de vicuña presentaron grosores entre 8.89 μm y 23.57 μm como se muestra en la **Tabla 5**, y se obtuvo un grosor promedio de 13.23 ± 0.68 μm . El coeficiente de variación fue de 23.02%, lo que indica una dispersión moderada entre las fibras. El valor promedio se encuentra dentro del rango de 10 a 16.50 μm reportado

para la fibra de vicuña (Pinares et al., 2024), lo que respalda la validez de las mediciones realizadas mediante este método.

Tabla 3

Resultados del grosor de fibra de Alpaca.

N°	Muestra	Grosor de la fibra (μm)
1	ALP_001	21.48
2	ALP_002	28.56
3	ALP_003	27.91
4	ALP_004	24.04
5	ALP_005	26.68
6	ALP_006	22.9
7	ALP_007	26.68
8	ALP_008	22.48
9	ALP_009	26.68
10	ALP_010	21.87
11	ALP_011	36.61
12	ALP_012	23.57
13	ALP_013	34.68
14	ALP_014	22.69
15	ALP_015	18.53
16	ALP_016	37.93
17	ALP_017	26.98
18	ALP_018	26.68
19	ALP_019	26.68
20	ALP_020	26.98
Media		26.53
Desviación		5.00
Coefficiente de variación		18.85
Incertidumbre Estándar		1.12
Incertidumbre lectura		0.05
Incertidumbre total		1.12

Tabla 4

Resultados del grosor de fibra de Llama.

Nº	Muestra	Grosor de la fibra (µm)
1	LLM_001	29.97
2	LLM_002	42.59
3	LLM_003	29.97
4	LLM_004	57.8
5	LLM_005	46.69
6	LLM_006	37.53
7	LLM_007	26.39
8	LLM_008	23.34
9	LLM_009	29.95
10	LLM_010	49.55
11	LLM_011	31.94
12	LLM_012	26.39
13	LLM_013	33.72
14	LLM_014	31.94
15	LLM_015	60.69
16	LLM_016	24.52
17	LLM_017	45.81
18	LLM_018	24.04
19	LLM_019	67.44
20	LLM_020	27.59
Media		37.39
Desviación		13.20
Coefficiente de variación		35.31
Incertidumbre Estándar		2.95
Incertidumbre lectura		0.05
Incertidumbre total		2.95

Tabla 5

Resultados del grosor de fibra de Vicuña.

N°	Muestra	Grosor de la fibra (µm)
1	VIC_001	11.34
2	VIC_002	8.89
3	VIC_003	11.9
4	VIC_004	23.57
5	VIC_005	15.08
6	VIC_006	12.91
7	VIC_007	12.58
8	VIC_008	10.24
9	VIC_009	11.14
10	VIC_010	12.2
11	VIC_011	11.4
12	VIC_012	15.17
13	VIC_013	14.37
14	VIC_014	15.66
15	VIC_015	11.9
16	VIC_016	15.46
17	VIC_017	11.73
18	VIC_018	12.78
19	VIC_019	14.37
20	VIC_020	11.84
Media		13.23
Desviación		3.04
Coefficiente de variación		23.02
Incertidumbre Estándar		0.68
Incertidumbre lectura		0.05
Incertidumbre total		0.68

4.3. Discusión

Los resultados obtenidos evidencian la relación inversamente proporcional entre la separación de los mínimos de difracción y el grosor de las fibras de lana. En términos físicos, las fibras más delgadas producen patrones con mayor separación entre franjas, mientras que las fibras más gruesas generan patrones más compactos. Este comportamiento se ajusta al modelo teórico de difracción de Fraunhofer en régimen de campo lejano, validando la técnica en la caracterización del grosor de las fibras de lana de camélidos sudamericanos en escala micrométrica.

La comparación entre los camélidos sudamericanos permitió observar diferencias en los grosores obtenidos $26.53 \pm 1.12 \mu\text{m}$ para la alpaca, $37.39 \pm 2.95 \mu\text{m}$ para la llama y $13.27 \pm 0.68 \mu\text{m}$ para la vicuña. Los resultados para la alpaca y vicuña muestran una concordancia con los rangos reportados por Montes & Palacios (2018), quienes señalan grosores entre 16 y 36 μm para la alpaca y valores inferiores a 14 μm para la vicuña. En el caso de la llama, el valor obtenido fue inferior al intervalo reportado, lo cual se atribuye a la variabilidad natural de las fibras, asociada a factores como la especie, la edad, la zona del vellón y las condiciones de crianza, tal como señalan Cardozo et al. (2016).

La vicuña presentó el menor grosor, resultado que coincide con las características reconocidas para esta fibra y con su elevado valor comercial dentro de la industria textil. Asimismo, los coeficientes de variación obtenidos fueron de ($CV \approx 18.85\%$, para la alpaca, 35.21% para la llama y 23.02% para la vicuña). Estos valores indican una dispersión moderada en las fibras de alpaca y una mayor variabilidad en las fibras de llama y vicuña, evidenciando la heterogeneidad natural presente entre las fibras.

Asimismo, los resultados obtenidos respaldan la utilidad de la difracción de Fraunhofer como técnica para la caracterización de las fibras, en concordancia con lo reportado por López et al. (2021) demostraron la eficiencia de este método para caracterización de las fibras mediante mediciones sin contacto directo con la fibra. La capacidad del prototipo fortalece la validez del método propuesto y respalda su aplicación como una alternativa de bajo costo para la determinación del grosor de las fibras de lana de los camélidos sudamericanos.

El procesamiento digital mediante MATLAB permitió automatizar la identificación de máximos y mínimos en los patrones de difracción, reduciendo la intervención del operador y minimizando posibles errores sistemáticos en la medición manual (Baltuano et al., 2006). La automatización del análisis incrementa la repetibilidad de las mediciones y mejora la consistencia de los resultados obtenidos. Asimismo, la incertidumbre total del prototipo, inferior 5%, evidencia la estabilidad del procedimiento experimental y respalda la confiabilidad del método propuesto para la caracterización del grosor de fibras de lana mediante difracción de Fraunhofer.

Una de las principales contribuciones de esta investigación es el desarrollo del prototipo experimental de bajo costo para la determinación del grosor de fibra de lana de camélidos sudamericanos. A diferencia de los equipos comerciales empleados para esta finalidad, nuestro equipo está implementado con accesorios comerciales en el mundo local como el puntero láser de $\lambda = 532nm$ y soportes que fueron diseñados en 3D y procesamiento digital de imágenes mediante MATLAB, la implementación en laboratorios con recursos limitados demuestra su accesibilidad y se evidencia la diferencia en los costos con los equipos comerciales.

Desde el punto de vista económico, nuestro equipo representa una alternativa de menor costo frente a equipos comerciales empleados para la medición del grosor de la fibra de lana. Baltuano et al. (2006) señalan que los equipos basados en escaneo láser LASER SCAN tienen un costo que supera los 100 000 USD y, además no disponen de versiones portátiles para mediciones en campo. Asimismo, indican que los equipos OFDA, aunque cuentan con versiones portátiles, presentan costos superiores a 70 000 USD. En cambio, el sistema desarrollado en esta investigación fue implementado utilizando componentes comerciales disponibles en el mercado local, reduciendo considerablemente el costo de implementación sin afectar la capacidad de estimar el grosor de fibras en escala micrométrica.

Adicionalmente, en las condiciones experimentales empleadas, el método es no destructivo, ya que la medición se realiza mediante la interacción del haz láser con la fibra sin alterar sus propiedades físicas. El corto tiempo de exposición al haz permite obtener mediciones rápidas, favoreciendo su posible aplicación en procesos de clasificación y control de calidad de fibras en comunidades altoandinas dedicadas a la crianza de camélidos sudamericanos.

No obstante, el método presenta algunas limitaciones que deben considerarse durante su implementación. La precisión de las mediciones depende del adecuado tensado y alineamiento de la fibra en el porta muestras, ya que cualquier curvatura, inclinación o desplazamiento puede modificar el patrón de difracción y generar errores en la estimación del grosor. Asimismo, es indispensable mantener la distancia entre la fibra y la pantalla dentro del régimen de campo lejano establecido por la teoría de difracción de Fraunhofer (Hecht, 2017).

Finalmente, los resultados obtenidos en la **Tabla 6** muestran una adecuada concordancia con nuestro prototipo y con los valores reportados en la literatura para fibras de alpaca, llama y vicuña. Esta relación, junto con la baja incertidumbre experimental, el carácter no destructivo del método, el procesamiento digital automatizado y el reducido costo de implementación, demuestra que nuestro equipo forma una alternativa confiable para la determinación del grosor de fibras de lana de camélidos sudamericanos y evidencia su potencial como herramienta de apoyo para procesos de investigación, clasificación y control de calidad dentro de las comunidades ganaderas.

Tabla 6

Tabla comparativa

Espece	Resultado	Valor Teórico	Referencias	Equipo utilizado
Alpaca	$26.53 \pm 1.12 \mu\text{m}$	20–32 μm	Apaza y Quispe (2020);	OFDA
			Lupton et al. (2006);	
			Quispe et al. (2023)	FIBER
Llama	$37.39 \pm 2.95 \mu\text{m}$	45–55 μm	Laime Huarcaya et al. (2016)	OFDA
Vicuña	$13.27 \pm 0.68 \mu\text{m}$	10–16.5 μm	Quispe Peña et al. (2009); Pinares et al. (2024)	OFDA 2000

Nota: Elaboración propia

Los resultados obtenidos y los valores teóricos muestran una concordancia para las tres especies de camélidos sudamericanos. El grosor obtenido para la fibra de alpaca $26.53 \pm 1.12 \mu\text{m}$, se encuentra dentro del límite superior del valor teórico 20–32 μm , mientras que el grosor obtenido para la vicuña $13.27 \pm 0.68 \mu\text{m}$, se ubica dentro del rango de 10 – 16.5 μm . En el caso de la llama, el valor promedio obtenido (37.39 ± 2.95

μm) fue superior al rango de 20 a 27 μm reportado para fibras finas. Esta diferencia puede atribuirse a la heterogeneidad natural del vellón, la edad del animal, la zona de muestreo y la presencia de fibras meduladas (Laime Huarcaya et al., 2016). Por ello, estos resultados respaldan la validez de nuestro prototipo para la caracterización del grosor de fibras de lana de la alpaca, llama y vicuña.

V. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

Se implementó satisfactoriamente un sistema experimental basado en el método de difracción de Fraunhofer para la determinación del grosor de las fibras de lana de camélidos sudamericanos, demostrando la viabilidad del método como una técnica óptica no destructiva y de bajo costo. El procesamiento digital de los patrones de difracción mediante MATLAB permitió calcular de manera eficiente la separación entre el máximo central y los mínimos de difracción, facilitando la estimación del grosor de las fibras a partir del modelo teórico. La automatización redujo la intervención manual y permitió obtener resultados con una incertidumbre inferior al 5%, lo que respalda la confiabilidad del método.

Los grosores obtenidos fueron (26.53 ± 1.12) μm para la alpaca, (37.39 ± 2.95) μm para la llama y (13.23 ± 0.68) μm para la vicuña, lo que evidencia diferencias entre las especies. La fibra de vicuña presentó el menor grosor. La alpaca mostró la menor variabilidad relativa ($\text{CV} = 18.85 \%$), seguida de la vicuña ($\text{CV} = 23.02 \%$); la llama presentó la mayor variabilidad ($\text{CV} = 35.31 \%$). Estos resultados indican una mayor uniformidad en las fibras de alpaca y vicuña en comparación con las fibras de llama.

Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura para las fibras de lana de los camélidos sudamericanos, lo que confirma la validez del método óptico y su capacidad para caracterizar las fibras de lana en el rango micrométrico. El método desarrollado constituye una alternativa confiable frente a métodos convencionales más complejos, ya que permite determinar el grosor de las fibras de lana de manera no destructiva, rápida y de bajo costo. Su implementación contribuye a la clasificación y valoración de la fibra de lana producida por los criadores

de camélidos sudamericanos, facilitando la identificación de fibras de lana de mayor calidad. De esta manera, el método tiene el potencial de fortalecer los procesos de control de calidad, incrementando el valor agregado del producto y favorecer la competitividad del sector de producción de fibras de lana de camélidos sudamericanos.

5.2. Recomendaciones

- Optimizar la precisión del cálculo mediante el análisis de órdenes superiores ($m=3$) y la implementación de algoritmos de procesamiento digital implementando detección automática de mínimos con ajuste gaussiano o análisis espectral.

5.3. Trabajos futuros

Estudio del grosor de las fibras de lana según la edad de los camélidos sudamericanos, con el fin de evaluar como las variaciones de grosor influyen en su caracterización y en la calidad textil de la lana.

Análisis comparativo del grosor de fibras de lana de los camélidos sudamericanos según procedencia geográfica, considerando su crianza en la costa, la sierra y zona altoandina de la región de Tacna, lo que permitirá identificar posibles efectos de las condiciones ambientales sobre su caracterización de la fibra de lana.

Estimación del grosor de la fibra de lana de guanaco, especie protegida cuya disponibilidad de sus fibras de lana es limitada en la región de Tacna (solo 139 ejemplares reportados en Revista Agroperú, 2024), lo que restringió su análisis experimental en este estudio.

REFERENCIAS

- AgroPerú. (2025, 12 de abril). Tacna registró aproximadamente 139 guanacos durante censo en zonas altoandinas. *AgroPerú*. <https://www.agroperu.pe/tacna-registro-aproximadamente-139-guanacos-durante-censo-en-zonas-altoandinas/>
- Aguilar Calla, M. (2012). *Esquila y caracterización de fibra de Alpaca*. Arequipa: DESCO - Programa Regional Sur.
- Apaza Zúñiga, E., & Quispe Coaquira, J. E. (2020). Precisiones sobre el diametro de fibra en alpacas de la región de Puno. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos naturales.*, 7(2), 7-15.
- Baltuano, O., Rojas, J., Aching, J., Rojas, D., Comina, G., Díaz, J., Rojas, A., Cifuentes, E., Cunya, E., Gago, J., Solís, J., & Rodríguez, J. (2006). Prototipo de fibrómetro digital computarizado para medición automática del espesor de fibra de alpaca. *Informe Científico Tecnológico*, 5, 105-113. <https://hdl.handle.net/20.500.13054/461>
- Baxter, B. P., Brims, M. A., & Taylor, T. B. (1992). Description and performance of the Optical Fibre Diameter Analyser (OFDA). *The Journal of the Textile Institute*, 83(4), 507-526. <https://doi.org/10.1080/00405009208631225>
- Berolatti Obando, G., Ruiz Mejía, L., Cabrera Bustamante, F. A., Aliaga Gutiérrez, J., Quispe Bonilla, M. D., & Quispe Peña, E. C. (2021). Evaluación de la medulación de fibras de lanas y fibras especiales de algunas especies de animales. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*.

- Born, M., & Wolf, E. (1999). *Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light* (7th ed.). Cambridge University Press.
- Cardozo, R., Quispe, J., & Ayca, R. (2016). Calidad de fibras de alpaca, llama, vicuña y guanaco. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*.
- Carrera-Gallissà, E. (2017). *Física textil: Propiedades físicas para caracterizar la calidad de las fibras textiles*. Universitat Politècnica de Catalunya. <https://hdl.handle.net/2117/106313>
- CONICET. (2012). Guanaco: Una alternativa de desarrollo sustentable. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas*.
- Constable, L., Arcidiacono, M., Vásquez, J., & Picco, J. (2011). *Tratamiento de Imágenes de Fibras Animales*. SEDICI (Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de La Plata).
- Cortés Osorio, J. A. (2013). Estudio de la difracción de Fraunhofer de una ranura simple mediante tratamiento digital de imágenes. *Univ. Tecnol. de Pereira, Dep. de Física*.
- Cortés Osorio, J. A., Chaves Osorio, J. A., & Mendoza, J. (2013). Estudio de la difracción de Fraunhofer. *Scientia Et Technica*, 18, 293-302.
- Fernando, U. A. (2020). *Difracción de Campo Lejano (Fraunhofer)*. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
- Flores Gutiérrez, A. (2009). *Caracterización etnozootécnica de las poblaciones de camélidos sudamericanos domésticos en comunidad de la provincia de Tacna, Perú*. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

- Gasvik, K. J. (2002). *Optical metrology* (3rd ed.). John Wiley & Sons Goodman, J. W. (2005). *Introduction to Fourier Optics*. Roberts & Company Publishers.
- Hecht, E. (2000). *Óptica*. Addison-Wesley.
- Hecht, E. (2017). *Optics* (5th ed.). Pearson.
- Islas Cortés, A., Guillén Buendía, G., & Montoya Vargas, Y. (2019). Aplicación de la secante hiperbólica en el diametro medio de fibras de lana. *Instituto Politécnico Nacional*.
- Laime Huarcaya, F. M., Pinares Huamaní, R., Paucara Ocsa, V., Machaca Machaca, V., & Quispe Peña, E. C. (2016). Características tecnológicas de la fibra de llama (*Lama glama*) Chaku antes y después de descender. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 27(2), 209-217. <https://doi.org/10.15381/rivep.v27i2.11643>
- López, A., Morales, J., & Santos, R. (2021). Aplicación de la difracción de Fraunhofer en la medición del diametro de fibras de alpaca. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 87, 45-46.
- Lupton, C. J., McColl, A., & Stobart, R. H. (2006). Fiber characteristics of the Huacaya alpaca. *Small Ruminant Research*, 64(3), 211-224. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.04.023>
- M Meza Núñez, M. (2018). *Caracterización física de la fibra de alpacas de color de la raza Huacaya en el distrito de Totos, provincia Cangallo, región Ayacucho a 4 438 m s. n. m.* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio Institucional UNSCH. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2806>

- Miller, S. D., & Rottmann, J. (1976). *Guía para el reconocimiento de mamíferos chilenos*. Editora Nacional Gabriela Mistral.
- Montes, M., & Palacios, J. (2018). *Calidad y comercialización de la fibra de alpaca y vicuña*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2005). *Situación actual de los camélidos sudamericanos en Perú*. FAO.
- Paitan Quispe, T. (2019). *Características tecnológicas de la fibra de alpaca (Vicugna pacos) de la Asociación de Productores Agropecuarios de Andibay* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio Institucional UNH. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/2873>
- Pinares, R., Lozano, F., & Machaca, V. (2024). Características textiles y longitud de fibra al descordado en vellón de vicuña. *Revista de Investigaciones veterinarias del Perú*, 35(1).
- Quispe, E. C., Iñiguez, J. M., & Pérez, L. A. (2009). Producción de fibra de alpaca, llama, vicuña y guanaco en Sudamerica. *Animal Genetic Resources Information*.
- Quispe, E. C., Rodríguez, T. C., Iñiguez, L. R., & Mueller, J. P. (2009). Producción de fibra de alpaca, llama, vicuña y guanaco en Sudamérica. *Animal Genetic Resources Information*, 45, 1-14. <https://doi.org/10.1017/S1014233909990277>
- Quispe, Y., Ayala, C., & Fernández, P. (2021). Caracterización de la producción de fibra de alpaca Huacaya (Vicugna pacos) en la comunidad originaria Chacaltaya. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 105-113.

- Quispe, Y., Ayala, C., & Fernández, P. (2023). Caracterización de la producción de fibra de alpaca Huarcaya (*Vicugna pacos*) en la comunidad originaria Chacaltaya. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 10(2), 105-113. <https://doi.org/10.53287/uywt2797sd33z>
- Quispe-Ccasa, H., Lloccallasi, N., Choquepuma, W., Huanca, N., Cayo-Colca, I., Saucedo U., J., Ampuero, E., & Cucho, H. (2020). Evaluación objetiva de características de finura y resistencia en vellones de llama (*Lama glama*) Ch'aku. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 31(2), e17823. <https://doi.org/10.15381/rivep.v31i2.17823>
- Rodríguez Iglesias, R. M. (1998). *Principales características que afectan el valor textil de la lana*. Producción Ovina, Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur.
- Rojas Vigo, D. A. (2006). Caracterización del espesor de las fibras de alpaca basada en análisis digital de imágenes. *Electrónica - UNMSM*, 17.
- Rosado Zavaleta, W. A. (2018). *Estimación del tamaño de cianobacterias haciendo uso de la difracción de Fraunhofer* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Cybertesis UNMSM. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/10107>
- Rottmann, S. M. (1975). *Guía para el reconocimiento de mamíferos chilenos*. Chile: Editora Nacional Gabriela Mistral / Corporación Nacional Forestal (CONAF).
- SGS Wool Testing Services. (2009). *OFDA (Optical Fibre Diameter Analyser)*. Animal Genetic Resources Information.

- Walker, J. W., Pope, R., & Pfeiffer, F. A. (2021). On-farm testing of FibreLux Micron Meter and OFDA2000 compared to Sirolan Laserscan in the laboratory. *Small Ruminant Research*, 200, 106401. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2021.106401>
- Z. Zhang, H. B. (2020). Comp. Simul. Fraunhofer Diffract. Based on MATLAB. *J. Phys. Educ.* 45, 123.

ANEXO A: Presentación en RIAO - OPTILAS



ANEXO B: Poster presentado en evento



Thickness analysis of South American Camelid Wool Fiber by Fraunhofer Diffraction

Jade Aguayo, Riquelme P-Cruz, Ivan Choque

Optical Laboratory, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú

jaguayoj@unjbg.edu.pe

RIAO

Abstract

In Tacna, Peru, the thickness of the South American Camelid (SAC) fiber wool is related with their price, for that reason it is important to measure it with high accuracy, and to quantize the appropriate cost. This work describes a detailed procedure to analyze the wool fiber thickness of the SAC by Fraunhofer diffraction. Twenty samples of fibers wools are obtained from each kind of SAC.

INTRODUCTION

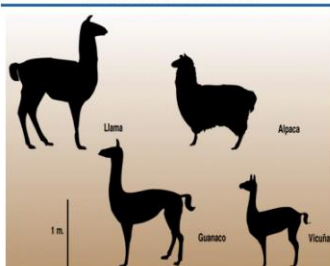


Fig. 1. South American camelids (SAC).

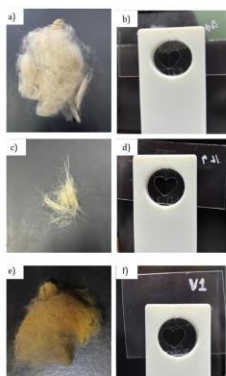


Fig. 2. Sample photographs: (a) alpaca lock, (b) alpaca fiber, (c) llama lock, (d) llama fiber, (e) vicuña lock, and (f) vicuña fiber

METHODS

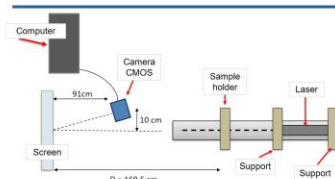


Fig. 3. Diagram of the Fraunhofer diffraction experimental setup for a wool fiber.

The diffraction pattern images used to measure the fiber thickness were obtained in the Optics Laboratory (UNJBG, Peru).

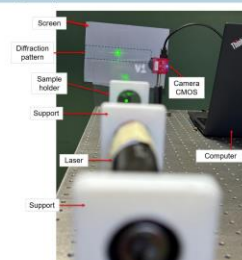


Fig. 4. Photograph of the Fraunhofer diffraction experimental setup for a wool fiber.

Each fiber was carefully stretched to maintain a straight alignment and to prevent deformation or breakage.

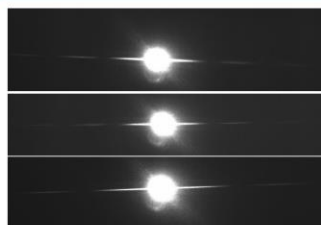


Fig. 5. Diffraction pattern of alpaca, llama, and vicuña wool fiber.

RESULTS

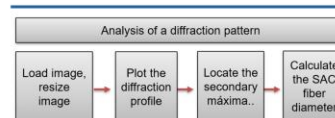


Fig. 5. Flowchart of the diffraction pattern analysis for wool fibers.

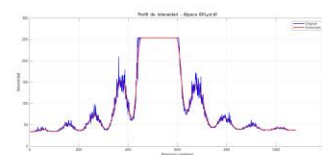


Fig. 6. Intensity profile of the diffraction pattern for alpaca fiber (Alpaca_001.tif)

Table 1. Average wool fiber diameter by species.

Species	Thickness (μm)	Deviation
Alpaca	18.75	± 2.92
Llama	21.77	± 5.43
Vicuña	12.77	± 1.63

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONS

- A non-destructive optical method was successfully implemented to calculate the wool fiber diameter of South American camelids using Fraunhofer diffraction.
- The results obtained are consistent with conventional measurements and existing literature.
- Automated analysis in MATLAB streamlines the process and enhances the objectivity of the results.

REFERENCES

- [1] E. Hecht, Optics, 5th ed. India: Pearson Education, 2002.
- [2] L. Cardozo, R. Arcos, and E. Quispe, "Variability of fiber diameter in South American camelids," Rev. Prod. Anim. Andina, vol. 8, no. 2, pp. 33–41, 2016.
- [3] R. Montes and D. Palacios, "Characteristics of vicuña (Vicugna vicugna) fiber and its comparison with other fine fibers," Rev. Textil Andina, vol. 12, no. 1, pp. 15–22, 2018.



ANEXO D: Rutina en MATLAB para la caracterización del grosor de la fibra de lana de CAS

```

clc, close all, clear all

% Parámetros experimentales

lambda = 532e-9; % longitud de onda del láser verde en metros

L = 1.84;          % distancia entre la fibra y la pantalla en metros (ajusta
según tu experimento)

m = 2;             % orden del mínimo

% Cargar imagen del patrón

PathName = 'C:\Users\USER\Downloads\TIFF';

img = imread(fullfile(PathName, ['LLM_14.tiff']));
img = img(:,:,2);
imshow(img);
title('Haz clic en el centro y luego en el segundo mínimoI');

%% Selección manual de puntos

[x, y] = ginput(2); % [x1,y1] centro; [x2,y2] primer mínimo

% Calcular distancia en píxeles

dist_pix = abs(x(2) - x(1));

% Convertir píxeles a metros (necesitas conocer la escala)

pix_per_meter = 10000; % ejemplo: 5000 píxeles por metro (ajusta según tu
calibración)

```

```

x_m = dist_pix/pix_per_meter;

% Calcular diámetro
d = (m*lambda*L)/x_m;

% Mostrar resultado
fprintf('El diámetro estimado de la fibra es %.2f micrómetros\n', d * 1e6);

%% Second part
% Step 2: Extract an image profile (e.g., take the middle row of the image)

% Asegúrate de que la imagen esté en escala de grises
if size(img,3) == 3
    img_gray = rgb2gray(img);
else
    img_gray = img;
end

[r, c] = size(img_gray);

% Perfil: máximo valor por columna
profile = zeros(1,c);
for i = 1:c
    profile(i) = max(img_gray(:,i));
end

% Vector de posiciones
x = 1:c;

```

```

% Suavizado del perfil
profileS = smooth(profile, 20);

% Gráficas comparativas
figure, plot(x, profile, 'b', x, profileS, 'r'), axis tight, grid on
title('Perfil original (azul) y suavizado (rojo)')

% Detección de picos
[pks, locs] = findpeaks(profileS);

% Mostrar perfil suavizado y picos detectados
figure, plot(x, profileS), axis([0 c 0 max(profileS)]), grid on
hold on
plot(locs, pks, 'ro')
title('Perfil suavizado con picos detectados')

%%
% Convertir píxeles a metros (necesitas conocer la escala)
dist_pix = 130.5;
pix_per_meter = 4700; % ejemplo: 5000 píxeles por metro (ajusta según tu
    calibración)
x_m = dist_pix/pix_per_meter;

% Calcular diámetro
d = (m*lambda*L)/x_m;

% Mostrar resultado

```

```
fprintf('El diámetro estimado de la fibra es %.2f micrómetros\n', d * 1e6);  
%%  
ref = imread(fullfile(PathName, 'ZREF_004.tiff'));  
ref = ref(:,:,2);  
figure, imshow(ref);
```

ANEXO E: Camélidos Sudamericanos

Figura a: Alpaca



Figura b: Llama



Figura c: Vicuña



Figura d: Guanaco

