NANOESTRUCTURACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DE FIBRAS PROTEICAS PARA SUPERFICIES TEXTILES Y MODA SOSTENIBLE.

MAITTE VALERIA CASTELLANOS PERILLA
DIANA CAROLINA SÁNCHEZ DÍAZ

Proyecto presentado como requisito para obtener el título de profesional en Ingeniería Química.

Directora: ALIS YOVANA PATAQUIVA MATEUS, IQ. MSc., PhD
Co-Directoras: ANGELA LILIANA DOTOR ROBAYO, MSc, PhD (c).

UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ DC.
2017

TABLA DE CONTENIDO

1. OBJETIVOS……6

1.1. Objetivo General……...6

1.2. Objetivos Específicos……...6

2. INTRODUCCIÓN 6

3. MATERIALES Y MÉTODOS 10

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA 11

3.2. SUAVIZADO DE LANA VIRGEN DE OVEJA 13

3.3. NANOESTRUCTURACIÓN *IN SITU* DE LANA VIRGEN DE OVEJA CON LUZ ULTRAVIOLETA 14

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LANA SUAVE Y NANOESTRUCTURADA .. 14

3.5. PRUEBAS MICROBIOLOGICAS Y DE LAVADO DE LANA SUAVE Y NANOESTRUCTURADA 14

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 15

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA……15

4.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA……...17

4.3. MORFOLOGÍA DE LA FIBRA ……..18

4.4. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA……...19

4.5. PRUEBAS DE SUAVIDAD DE LA FIBRA……..…. 20

4.6. PRUEBAS MICROBIOLOGICAS Y DE LAVADO DE LANA SUAVE Y NANOESTRUCTURADA……....22

4.7. APLICACIÓN INDUSTRIAL.....……...25

CONCLUSIONES 26

RECOMENDACIONES 27

AGRADECIMIENTOS 27

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 27

ANEXO 1…….. 29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Lana virgen Cundiboyacense……...6

Figura 2. Composición de la fibra de lana (Hearle, 2002)……....7

Figura 3. Documentos por país acerca del tratamiento de lana virgen (Elsevier, 2004)……7

Figura 4. Documentos por año acerca del tratamiento de lana virgen (Elsevier, 2004)……8

Figura 5. Montaje para la determinación de densidad de la fibra. Basado en ASTM D 1907 (ASTM, 2000a). Dónde: r, diámetro interno de la madeja; R, diámetro externo de la madeja…..…….....11
Figura 6. Montaje para la determinación de secado por torsión para la fibra proteica Lana……..……..……12
Figura 7. Montaje para determinar de la suavidad de la fibra por el método del coeficiente de fricción (Díaz y Limas, 2016)……....……13
Figura 8. Fibra de lana suavizada y nanoestructurada con plata...……..…17
Figura 9. Análisis de espectroscopia infrarroja (FTIR) de (A) lana sin tratamiento, (B) lana después del proceso de suavizado y (C) lana suavizada y nanoestructurada……..……....17
Figura 10. EDS fibras de lana suavizadas y nanoestructuradas.……18
Figura 11. Fibra de lana virgen de oveja a diferentes condiciones (A) Lana sin tratamiento, (B) Lana después del proceso de suavizado y (C) Lana suavizada y nanoestructurada.……..……...…18
Figura 12. Comportamiento a la tracción de la fibra de (A) lana sin tratamiento, (B) lana después del proceso de suavizado y (C) lana suavizada y nanoestructurada...……..……19
Figura 13. Comportamiento de elongación de la fibra de (A) lana sin tratamiento, (B) lana después del proceso de suavizado y (C) lana suavizada y nanoestructurada...……..……20
Figura 14. Coeficientes de fricción obtenidos en la interacción de la fibra con cubo de madera más una masa de100g, 200g y 300g que corresponde a 1, 2 y 3, respectivamente de (A) lana sin tratamiento, (B) lana después del proceso de suavizado y (C) lana suavizada y nanoestructurada.……....……21
Figura 15. Coeficientes de fricción obtenidos en la interacción de la fibra con cubo de madera con adición de lija más una masa de100g, 200g y 300g que corresponde a 1, 2 y 3, respectivamente, de (A) lana sin tratamiento, (B) lana después del proceso de suavizado (B) y (C) lana suavizada y nanoestructurada.....…….....……21
Figura 16. Efecto antibacterial de las fibras de lana suavizadas y nanoestructuradas en (A) *Pseudomonas aeuroginosa* y (B) *Staphylococcus aureus*, y el efecto antibacterial de las fibras de lana virgen de oveja en (C) *Pseudomonas aeuroginosa* y (D) *Staphylococcus aureus*.……..……..……....……22
Figura 17. Micrografías donde se observa en la imagen a la izquierda BSE (Back Scattering Electrond) y en el centro SE (Secondary Electrons) y en la derecha EDS (A) lana suavizada y nanoestructurada sin lavado, (B) lana suavizada y nanoestructurada con 1 lavado, (C) lana suavizada y nanoestructurada con 3 lavados, (D) lana suavizada y nanoestructurada con 5 lavados, (E) lana suavizada y nanoestructurada con 7 lavados y (F) lana suavizada y nanoestructurada con 10 lavados…….……....……24

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Nanopartículas empleadas en técnicas textiles (Gulrajini, 2013)……..……..9
Tabla 2. Resultados de caracterización para lana virgen de oveja.…..……..….15

Tabla 3. Sentido de secado por torsión de diferentes fibras naturales (SENA - Centro Nacional, 2009)……..……..….16
Tabla 4. Coordenadas determinadas por el colorímetro (Minolta CR – Konica 400) para la determinación del color de la fibra de lana.……....…..16
Tabla 5. Resultados obtenidos para la determinación del color de la fibra de lana....…16
Tabla 6. Datos de los coeficientes de fricción obtenidos en la evaluación de la suavidad en la fibra de lana…….……..…....20
Tabla A1. Reactivos utilizados experimentalmente…….. 29
Tabla A2. Experimentación modificando variable tiempo……. 29
Tabla A3. Experimentación modificando las variables tiempo y temperatura.…….. 30
Tabla A4. Resultados obtenidos para para cada condición del coeficiente de fricción …….…… 31
Tabla A5. Resultados promedio de coeficientes de fricción…….. 32

NANOSTRUCTURATION AND EXPERIMENTATION OF PROTEIN FIBERS FOR TEXTILE SURFACES AND SUSTAINABLE FASHION.

Castellanos. M., Sánchez. D, Pataquiva-Mateus, A.Y.*
Departamento de Ingeniería, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá Colombia.
Programa de Ingeniería Química, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá Colombia.
*Autor de correspondencia: alisy.pataquivam@utadeo.edu.co

Abstract

To provide an added value and a more complete use of the virgin wool from the Cundiboyacense highlands, it was developed in the methodologies for the replacement of the improved properties; the first focuses on the smoothing of the fiber and the second on *in situ* nanostructuring based on the addition of ultraviolet light to promote the growth of silver nanoparticles (AgNPs) on the surface of the yarns. The AgNPs incorporated in the structure of the previously smoothed fiber allowed a delay the microbial activity, this demonstrated with the halos of inhibition formed when the fibers are in contact with *P. aeruginosa* and *S. aureus*. Additionally, the percentage of elongation was increased 1,42 times and the Young's modulus increased 31 times, with respect to the values of elongation (26,47%) and Young's modulus (0,086 MPa) of the wool in its natural state.

Key words: *sheep virgin wool, silver nanoparticles, smoothness, microbial activity, nanotechnology*

NANOESTRUCTURACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DE FIBRAS PROTEICAS PARA SUPERFICIES TEXTILES Y MODA SOSTENIBLE.

Resumen

Con el fin de otorgar un aprovechamiento con valor agregado de la lana virgen proveniente del altiplano Cundiboyacense, se desarrollaron dos metodologías para proporcionarle propiedades mejoradas; la primera se centra en el suavizado de la fibra y la segunda en la una nanoestructuración *in situ* basada en la adición de luz ultravioleta para promover el crecimiento de nanopartículas de plata (AgNPs) en la superficie de los hilos. Las AgNPs incorporadas en la estructura de la fibra previamente suavizada proporcionaron un mejoramiento en las propiedades del textil, puesto que retrasaron la actividad microbiana, esto demostrado con los halos de inhibición formados cuando las fibras estas en contacto con *P. aeruginosa* y *S. aureus*. Adicionalmente, se aumentó el porcentaje de elongación 1,42 veces y el módulo de Young aumentó 31 veces, con respecto a los valores de elongación (26,47%) y módulo de Young (0,086 MPa) de la lana en su estado natural.

Palabras clave: *lana virgen de oveja, AgNPs, suavidad, actividad microbiana, nanotecnología*

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología para el suavizado de la lana virgen de oveja Cundiboyacense y la estructuración a nano escala capaz de conferirle propiedades antibacterianas a la misma.

1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar de manera física, química y mecánica la lana de oveja proveniente del altiplano Cundiboyacense.
- Proveer de suavidad la lana virgen a partir de procesos físicos, químicos y mecánicos.
- Recubrir a nivel nanométrico las fibras de lana virgen y proporcionarle propiedades antibacterianas.
- Identificar una aplicación potencial en el campo textil para las fibras suavizadas y nanoestructuradas.

2. INTRODUCCIÓN

La industria textil satisface una de las necesidades vitales del hombre como es el vestir. En Colombia, esta industria se presenta principalmente en las ciudades de Bogotá (53%) y Medellín (38%) con productos en materiales como algodón y poliéster. En cuanto a la investigación realizada, dentro de esta industria se observan diferentes problemas y retos principalmente como: la actualización de procesos tecnológicos, el desarrollo de productos con nuevas características (textiles no arrugables, repelentes a manchas y grasas, antibacteriales, con sensores, entre otros), altos costos de químicos para tratamiento de textiles y altos desperdicios de materia prima (López, 2011).

Por otro lado, es ampliamente conocida la naturaleza agreste de la lana Cundiboyacense. Sin embargo, se considera que es un recurso que puede generar productos con gran impacto a nivel social y económico dentro del país, brindando posibilidades de generar nuevos productos con costos menores y diferentes propiedades (Rodríguez, 2014).

Figura 1. Lana virgen de oveja Cundiboyacense.

La lana, compuesta principalmente por keratina (con un alto contenido de azufre), es una fibra natural multifuncional para la manufactura especialmente de prendas de vestir (Hearle, 2002). La composición de una fibra de lana se puede observar en la Figura 2.

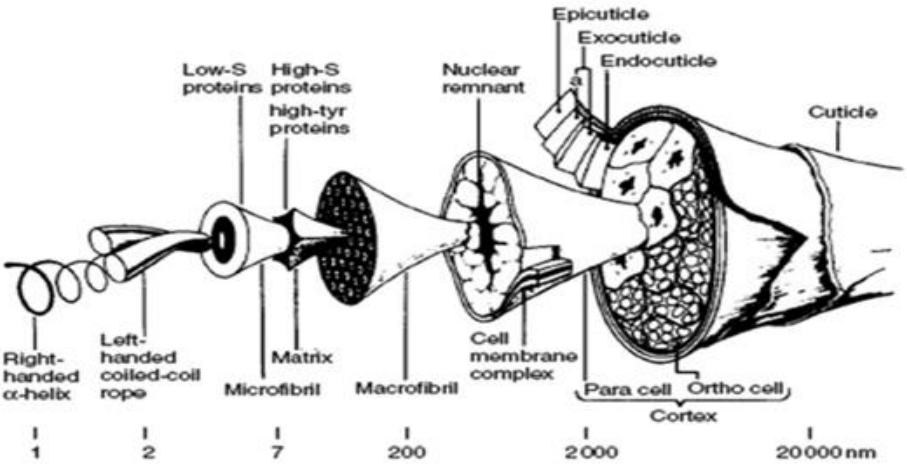


Figura 2. Composición de la fibra de lana (Hearle, 2002).

La lana se considera como una fibra de origen animal que posee diferentes características que hacen de la lana una fibra especial y diferente en el mercado textil. Sus principales características son: alta absorción de humedad (hasta un 30%), aislación térmica, fácil limpieza, alto porcentaje de elongación, resistencia a la abrasión, entre otras (Hearle, 2002).

La lana es una fibra que no ha sido estudiada de manera extensa, debido a que su utilización dentro de la industria textil ha sido directa; es decir, no presenta ningún tratamiento previo que mejore sus características físicas, químicas o mecánicas, siendo esto reflejado en la escasa información encontrada acerca del suavizado y la nanoestructuración de esta fibra de origen animal, tal y como se observa en la Figura 3 que presenta el número de documentos (artículos científicos y capítulos de libro) por país que se han elaborado acerca del tratamiento de suavizado y nanoestructurado sobre la fibra de lana virgen.

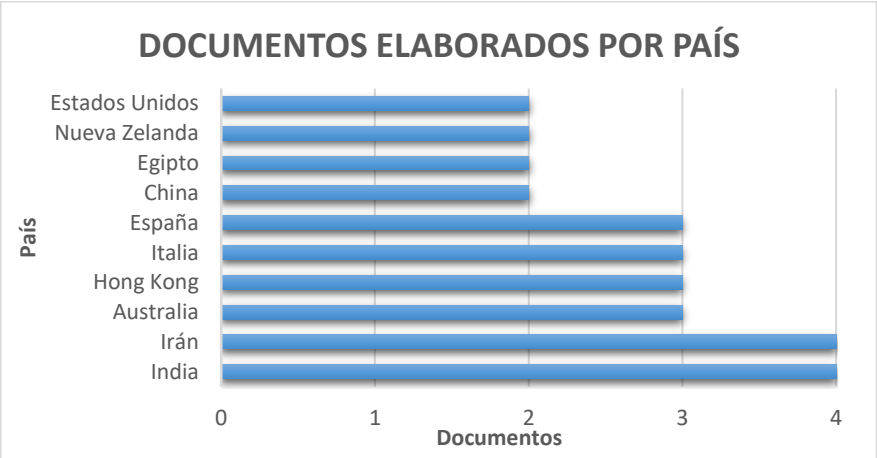


Figura 3. Documentos por país acerca del tratamiento de lana virgen (Elsevier, 2017).

En la Figura 3 se observa que los países pioneros son India e Irán con 4 documentos elaborados en total, así como la ausencia de Colombia en la elaboración de documentos sobre el tema de suavizado y nanoestructurado de la lana virgen, consulta realizada durante el año 2017.

Adicionalmente, en la Figura 4 se observa que la investigación sobre la fibra de lana se ha venido realizando a partir del año 2007. Sin embargo, ninguno de los documentos elaborados presenta específicamente la fibra de lana del altiplano Cundiboyacense; razón por la cual el estado del arte del suavizado y nanoestructurado de la lana es mínimo.

Por otro lado, la nanotecnología es una herramienta emergente que permite manipular la materia a escala nanométrica ($1x10^{-9}$ m) a partir de diversas rutas de síntesis para la producción de nanopartículas, las cuales pueden ser involucradas en la funcionalización de diversos materiales (Monguillo, 2007). En este caso, las fibras naturales empleadas en la industria textil vienen ganando aprecio por parte de los consumidores que buscan materiales de origen renovable y que no provengan de los derivados del petróleo (Hearle, 2002). En la Tabla 1 se observan algunas de las nanopartículas que han sido empleadas en textiles y su aplicación dentro de esta industria.

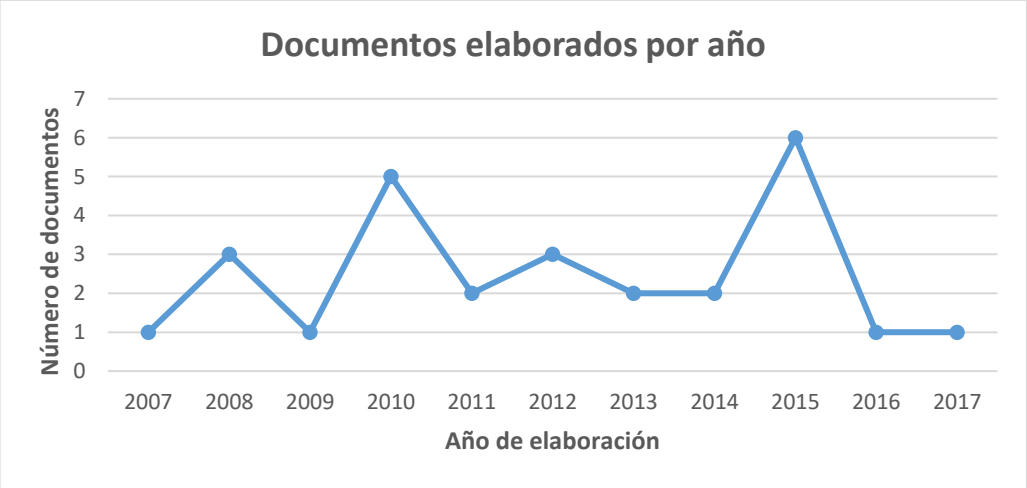


Figura 4. Número de documentos por año relacionados con tratamiento de lana virgen (Elsevier, 2017).

Tabla 1. Nanopartículas (NPs) empleadas en técnicas textiles.

FUNCIÓN	NPs	DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	REFERENCIA
Autolimpieza	TiO_2, fluroacrilatos, SiO_2*, CNT	Textiles para muebles repelentes de manchas, paraguas, equipaje fácil de limpiar, pantalones autolimpiantes, corbatas, abrigos.	(Gowri *et al.*, 2010; Holme, 2009; Linford *et al.*, 2005; Siegfried, 2007; Soane & Offord, 2002; Xue *et al.*, 2010a)
Antibacterial	Ag, quitosano, SiO_2*, TiO_2, ZnO	Ropa interior anti-olor, calcetines, plantillas, cascos y otros equipos deportivos, textiles para muebles y sábanas, esponjas de cocina, toallas; Máscaras faciales biocidas, mantas, vestidos para pacientes, guantes quirúrgicos.	(Dastjerdi and Montazer, 2010; Siegfried, 2007)
Conductividad	Cu, polipirroles, polianilina	Ropa elegante con función de detección, alfombras aislantes y revestimiento de suelo, trajes con funciones electromagnéticas, filtros anti-chispa.	(Gulrajani, 2013; Siegfried, 2007)
Bloqueadores UV	TiO2, ZnO	Ropa deportiva con bloqueo UV, con protección solar integrada, tejido de camisa, agentes de revestimiento, sombrillas.	(Siegfried, 2007; Xue *et al.*, 2010b)
Resistencia a la llama	Sb_3O_2, CNT, boroxosiloxano, montmorillonita	Trajes resistentes a la llama, guantes, alfombras, cortinas, textiles para muebles, cojines de asiento, forros.	(Siegfried, 2007; Gulrajani, 2013)
Refuerzo	CNT	Chaquetas y chalecos antibalas.	(Siegfried, 2007; Gulrajani, 2013)
Liberación controlada de fármacos activos o fragancias	Montmorillonita, SiO_2*	Chaquetas repelentes de insectos, tiendas de campaña; Textiles para muebles, alfombras, cortinas; Apósitos para liberación de fármacos.	(Siegfried, 2007; Gulrajani, 2013)
Luminiscencia	Colorantes sensibles a los estímulos	Textiles con efectos de cambio de color.	(Siegfried, 2007; Gulrajani, 2013; Holme, 2007)
Aislamiento térmico	Estructura de Si nanoporosa	Chaquetas de montaña aislantes térmicamente para bajas temperaturas, plantillas de zapatos.	(Siegfried, 2007; Gulrajani, 2013; Linford *et al.*, 2005)

*SiO_2-nanosol-coating como matriz para especies activas incrustadas (biocidas, colorantes, fragancias)

En cuanto a la nanoestructuración de lana en general, se han empleado diferentes técnicas confiriendo distintas propiedades: (i) Coloración de textiles con nanopigmentos capaces de difundirse en las fibras, o la adición de plata para proporcionar condiciones antimicrobianas y resistencia a las lavadas (Denning, 2009), (ii) Lanas con efecto “hoja de loto” o fibras nanoestructuradas con películas de dióxido de titanio en su forma cristalina (anafase) para proporcionar propiedades de auto-limpieza y como fotocatalizador para oxidar los compuestos orgánicos (Denning, 2009) y, (iii) Fibras de lana con ciclodextrinas para atrapar olores durante el desgaste, los cuales son liberados durante el lavado, así como en el encapsulamiento de fragancias en fibras (Denning, 2009).

Por esta razón, la confección de prendas de vestir a partir de lana del altiplano Cundiboyacense podría encontrar nuevos mercados a partir de una mayor suavidad y

propiedades antibacteriales, permitiendo la entrada de la fibra en otras aplicaciones destinadas a lanas importadas como lo son lana merino y alpaca, que se distinguen por su textura y suavidad. En términos económicos, una lana nanoestructurada podría revolucionar el diseño y confección de prendas de vestir en los departamentos de tradición de producción de ésta, teniendo un valor agregado en la venta de fibras y atuendos.

Finalmente, este proyecto tiene como finalidad desarrollar una metodología para el suavizado de la lana virgen de oveja Cundiboyacense y la estructuración a nanoescala capaz de conferirle propiedades antibacterianas a la misma. Esta investigación relaciona interdisciplinariamente la ciencia y el arte a través de la Ingeniería Química y la Gestión y el diseño de moda, generando nuevos conocimientos que permitan el desarrollo de nuevas fibras a partir de metodologías amigables con el medio ambiente.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir el objetivo de este trabajo se desarrolló inicialmente, una caracterización de la fibra que permitiera reconocer las propiedades originales de la lana. Dentro de las herramientas para llevar a cabo esta caracterización física se encontraron: microscopía electrónica de barrido (SEM, de sus siglas en inglés), la cual permitió una identificación del material a nivel nanométrico presentando como resultado la morfología de la fibra. Por otro lado, la caracterización mecánica se llevó a cabo con una máquina universal que permitió la obtención del módulo de Young en el caso de la elasticidad del material, así como el valor de la carga máxima antes de su ruptura, permitiendo así determinar la resistencia a la tracción que tiene el material. Finalmente, para la caracterización química se emplearon herramientas tales como espectroscopía, infrarroja de transformada de Fourier (FTIR, de sus siglas en inglés) mediante la cual fue factible conocer los grupos funcionales orgánicos que componen el material y espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS, de sus siglas en inglés) que permitió conocer la presencia de elementos químicos en la muestra.

Adicionalmente, se propuso una metodología pionera para llevar a cabo el suavizado de la fibra a partir de diseños experimentales (Anexo 1) mediante el uso de un producto comercial cuyo componente activo es dicosacetil hidroxietilamonio metosulfato (DHM) denominado reactivo “Y”. Luego, se realizó la caracterización mencionada anteriormente para la fibra suavizada.

Finalmente, para conferir las propiedades antibacterianas se utilizó la nanoestructuración *in situ* a partir de nitrato de plata ($AgNO_3$) sintetizado mediante la irradiación de rayos UV. La fibra natural, pretratada (suavizada) y nanoestructurada fueron objeto de caracterización física, verificando propiedades de morfología, tamaño, superficie, resistencia y elongación, entre otras que son valores de gran importancia en la industria textil; y caracterización química, verificando su composición química.

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA

Se llevó a cabo la siguiente metodología de caracterización, para la cual la lana fue estudiada tal y como fue recibida.

Inicialmente, se determinó el diámetro de la fibra (*n=20*) mediante micrómetro digital (Digital Mitutoyo MIT500-197-20B); luego, el color fue evaluado por medición directa (*n=10*) por colorimetría (CR-400 Konica Minolta) obteniendo como resultados los parámetros a*, b* y L* para calcular posteriormente c* (Ecuación 1), °HUE (Ecuación 2) y el índice de color (IC) (Ecuación 3), y determinar finalmente la tonalidad y el matiz de cada muestra.

$$c^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \tag{1}$$

$$°HUE = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) * \frac{180}{\pi} \tag{2}$$

$$IC = \frac{a^* * 100}{L^* * b^*} \tag{3}$$

En la determinación de la densidad de la fibra, se utilizó el montaje que se aprecia en la Figura 5 basada en la Norma ASTM D 1907 (ASTM, 2012) el cual corresponde al método de densidad lineal en sistema directo. Para realizar esta medición se utilizó una madeja de lana, estableciendo el número de vueltas y se midió el diámetro externo (R) e interno (r) de las circunferencias que forman el rollo; así como la masa y el diámetro transversal del hilo.

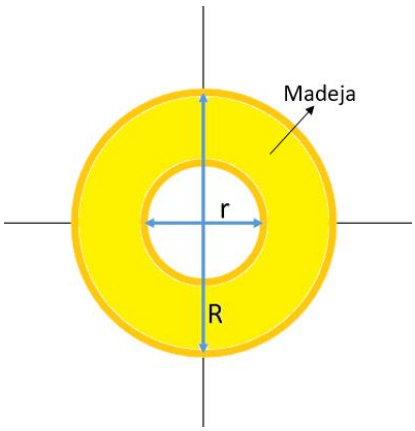


Figura 5. Montaje para la determinación de densidad de la fibra. Basado en ASTM D 1907 (ASTM, 2012). Donde, r es el diámetro interno de la madeja y R es el diámetro externo de la madeja.

A partir de los diámetros interno y externo de la madeja, y el diámetro transversal del hilo (g), que fue determinado mediante un calibrador, se estimó el perímetro del rollo con la Ecuación 4.

$$P = \frac{\pi \times (r + g + R) \times (R - r)}{g} \quad (4)$$

Posteriormente, se estimó la longitud de la madeja como el producto entre el perímetro calculado anteriormente y el número de vueltas establecido. De esta manera se determinó la densidad lineal por el sistema directo con la ecuación 5.

$$\rho_{Linear} = \left(\frac{M}{L}\right) \times \left(\frac{A}{B}\right) \quad (5)$$

Donde, M: masa de la madeja, L: longitud de la madeja, A/B = 3,225 (factor establecido por la norma según las unidades de M y L).

Con respecto a la finura o espesor de un hilado fue necesario determinar el título de hilo en sistema directo como decitex (dTex), el cual refleja el peso en gramos de 10000 metros de lana seguido del número de cabos que lo conforman (Giraldo, 2015).

Por otro lado, para la determinación de la humedad seis muestras de fibra fueron llevadas al desecador durante 48 h y empleando un analizador de humedad (modelo HB43-S marca Toledo) se estableció esta propiedad en cada una de las muestras.

Para determinar el comportamiento del secado por torsión de la fibra Norma ASTM D276 (ASTM, 2000), se tomaron hilos de la fibra de 20 cm (*n = 10*), los cuales fueron sumergidos en agua destilada y posteriormente, fueron puestos sobre una placa caliente (Figura 6), fijando los hilos con soportes metálicos y colocando una de las puntas en dirección al observador. Este, fue quien identificó el lado (derecho o izquierdo) al cual gira la fibra durante el secado.

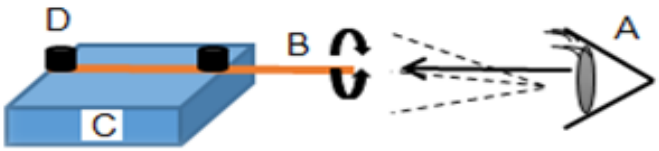


Figura 6. Montaje para la determinación de secado por torsión para la fibra proteica Lana. Basado en ASTM D276 (ASTM, 2000a). Donde, A: observador; B, muestra de fibra mojada; C, placa de calentamiento; D, soportes (Díaz y Limas, 2016).

Adicionalmente, se analizó la composición química de la fibra empleando un espectrofotómetro de infrarrojo (FTIR, Prestige-21, Shimadzu, Japón), con un accesorio ATR universal con diamante y cristal de ZnSe para realizar una medición por fibra en un rango de 600-3600 cm^{-1} a temperatura ambiente.

La estimación de propiedades mecánicas como la tensión y la elongación se realizó según la norma ASTM D2524-95 (ASTM, 2008) por medio de una máquina universal (Jinan Testing Equipment IE Corporation) con 5 repeticiones para calcular el módulo de Young (Ecuación 6) junto al porcentaje de elongación (Ecuación 7).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$\%_{elongación} = \varepsilon * 100 \quad (7)$$

Donde, σ es el esfuerzo y se determina como: $\sigma = \frac{F}{A}$; teniendo en cuenta que F es la fuerza aplicada y A es el área transversal de la fibra, ε : deformación calculada como: $\varepsilon = \frac{L_f - L_o}{Lo}$; con L_f como la longitud final y L_o como la longitud inicial de la fibra.

La morfología de la partícula fue analizada mediante visualización del recubrimiento de la muestra por microscopía electrónica de barrido SEM (JEOL, modelo JSM 6490-LV); teniendo en cuenta que, para realizar el procedimiento, las fibras fueron sometidas a un recubrimiento de oro (Metalizador Dentom Vacuum Desk IV) con un espesor aproximado de 10 nm.

Finalmente, se determinó el grado de suavidad de la fibra de manera indirecta a partir del coeficiente de fricción. Para este procedimiento se utilizó la metodología de Ospina (2001). Brevemente, se realizó el montaje de la Figura 7 donde la fibra fue colocada en una superficie (A) y soportó un cubo de madera (B) más un peso (C). Para determinar la suavidad de manera cualitativa, se midió la fuerza de fricción con el dinamómetro (D) mientras se deslizó el binomio cubo-peso en dirección opuesta a este, manteniendo constante el empuje. El procedimiento se repitió utilizando un cubo con base de lija y diferentes masas (100, 200 y 300 g) *(n=10).*

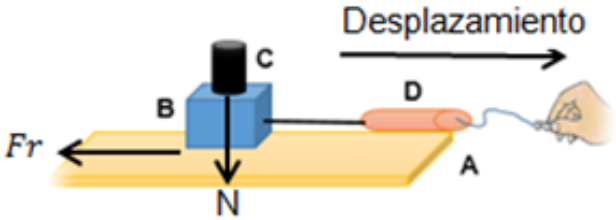


Figura 7. Montaje para determinar de la suavidad de la fibra por el método del coeficiente de fricción (Díaz y Limas, 2016).

A partir de los datos de fuerza de fricción se obtiene el coeficiente de fricción (μ) mediante la Ecuación 8.

$$\mu = \frac{Fr}{N} \quad (8)$$

Donde, Fr es la fuerza de rozamiento y N es la fuerza normal. Se determinó el coeficiente de fricción como medida indirecta de la suavidad obtenida en la fibra para realizar una comparación con los coeficientes de fricción de otras fibras de suavidad conocida.

3.2. SUAVIZADO DE LANA VIRGEN DE OVEJA

Una vez que la lana ha sido caracterizada física y químicamente, se procedió a realizar el suavizado en una muestra de lana virgen de oveja (*n=10*). Teniendo en cuenta que en la literatura no se encuentra ningún tipo de metodología destinada a proporcionar suavidad en las fibras de lana virgen, se propuso elaborar una técnica nueva desarrollada a partir del estudio de la composición química que tiene esta fibra, la cual

indica la presencia de puentes disulfuro dentro de la misma debido a la proteína principal que la contiene (keratina).

El reactivo seleccionado para realizar el proceso de suavizado de la fibra fue el dicosacetil hidroxietilamonio metosulfato (DHM) presente en un producto capilar comercial (Hidromasaje Capilar), el cual actúa como agente acondicionador y precursor de suavidad en la fibra de lana. Inicialmente, se lavaron las fibras con shampoo comercial sin sal para retirar impurezas presentes en la lana. Posteriormente, se extendió una capa de aproximadamente 0,5 g de DHM (para 0,2 g de lana) sobre cada una de las fibras y se frotaron tres veces para asegurar una correcta penetración a lo largo de la misma. Una vez humectadas, las fibras fueron cubiertas con papel aluminio y se colocaron en una plancha de calentamiento a una temperatura de 21°C durante tres horas; y luego fueron secadas mediante el uso de una plancha de ropa convencional a una temperatura de 24°C. Luego, las fibras nuevamente fueron cubiertas con papel aluminio y se dejaron en reposo durante tres días. Finalmente, se lavaron nuevamente con shampoo comercial sin sal y se adicionó un termoprotector para cabello (TRESemmé Keratin Smooth) con el fin de prolongar la suavidad; nuevamente se plancharon a 24°C hasta su secado, para lograr un mejor acabado.

3.3. NANOESTRUCTURACIÓN *IN SITU* DE LANA VIRGEN DE OVEJA CON RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

Para realizar la nanoestructuración con plata sobre las fibras de lana suavizadas, se utilizó la metodología propuesta por Lu y colaboradores (Lu, Z. *et al*., 2014): las fibras de lana fueron sumergidas en una solución de nitrato de plata 10 mM y expuestas durante 5 h a la luz UV generada por un circuito con 16 bombillos LED (3W) en una protoboard, generando la disociación del $AgNO_3$ que muestra la Reacción 1. Al finalizar este tiempo, las fibras se colocaron sobre papel aluminio para dejar secar completamente a temperatura ambiente.

$$AgNO_3 \xrightarrow{Luz\ UV} Ag^+ + NO_3^- \qquad (1)$$

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LANA SUAVE Y NANOESTRUCTURADA

Una vez realizado el proceso de suavizado y nanoestructuración de lana virgen, se llevó a cabo una caracterización física, química y mecánica de las fibras antes y después de los procesos de suavizado y nanoestructuración, siguiendo la metodología presentada en el numeral 2.1.

3.5. PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS Y DE LAVADO DE LANA SUAVE Y NANOESTRUCTURADA

Para verificar la capacidad antimicrobiana de las fibras, se realizaron pruebas por triplicado con *Staphylococcus aureus* y *Pseudomona aeruginosa*, las cuales son bacterias comúnmente encontradas en la piel. Se empleó medio TSA (Tripticasa Soja Agar) y se observó la presencia/ausencia de microorganismos sobre las muestras.

Por otro lado, para determinar cuántas lavadas resiste la lana suavizada y nanoestructurada sin perder sus propiedades, se realizaron 1, 3, 5 y 10 lavados en una lavadora convencional de ropa doméstica (carga superior sin agitador, 17 kg de capacidad, referencia TurboDrum Diamond Glass marca LG) (Díaz y Limas, 2016), para caracterizar cada una de las muestras mediante visualización por SEM y verificar la adhesión de las nanopartículas a la fibra.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA

Hasta el momento, la lana virgen de oveja Cundiboyacense no ha sido objeto de investigación en cuanto a su caracterización física o química, razón por la cual los datos mostrados a continuación son inéditos en la literatura; así, como los resultados obtenidos para el proceso de suavizado y nanoestructuración a este tipo de fibra animal proteica.

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de la fibra de lana antes y después de realizar el tratamiento de suavizado y nanoestructurado (*n=5*)*.

	Fibra de lana virgen	**Fibra de lana suavizada**	**Fibra de lana suavizada y nanoestructurada**
Diámetro (mm)*	1,22 **+/-** 0,26	0,12 **+/-** 0,034	0,18 **+/-** 0,07
Humedad (%)*	16,405 **+/-** 0,85	19,350 **+/-** 2,31	16,920 **+/-** 0,85
Densidad lineal (g/m)	0,0472	0,0614	0,0423
Título dTex (decitex)	73/2	138/2	66/2

En la Tabla 2, se observa que el diámetro de la fibra de lana virgen presenta 1,1 mm de más con respecto a la lana suavizada y 1.04 mm de más con respecto a la fibra después de los dos tratamientos (suavizado y nanoestructurado). Estos resultados permiten establecer que el diámetro disminuye al realizar los diferentes procedimientos sobre la fibra. Este comportamiento puede presentarse debido a la eliminación de impurezas de la muestra sin tratar y el estiramiento de las capas que conforman la fibra con el proceso de suavizado. Sin embargo, se observa que el diámetro aumenta 0,06 mm después de realizar la nanoestructuración *in situ* respecto a la fibra suavizada, lo cual se presenta debido a la agregación del recubrimiento sobre la lana y la exposición a la luz ultravioleta.

En cuanto, al contenido de humedad, se observa que la fibra suavizada presenta un porcentaje más alto respecto a las otras dos muestras; esto se debe a que en el proceso de suavizado se abren los poros de la fibra debido a que se rompen los enlaces disulfuro presentes en la keratina, haciendo que se retenga una mayor cantidad de agua. No obstante, después de realizar el proceso de nanoestructuración, posiblemente las AgNPs ocupan los lugares de los enlaces rotos, lo que ocasiona que se disminuya la cantidad de agua retenida volviendo prácticamente al valor inicial de la fibra natural.

Por otro lado, la densidad lineal es una unidad de masa por unidad de longitud característica de hilos u objetos unidimensionales. De acuerdo a los datos que muestra la Tabla 2, se observa que la lana suavizada es un 30% más gruesa que la lana virgen

debido a la apertura de los poros después de realizar el tratamiento, ya que se genera una fibra mucho más esponjosa y dispersa que la muestra inicial. Adicionalmente, se observa que la lana nanoestructurada es un 31% más delgada que la suavizada, ya que en los poros se logran alojar las nanopartículas de plata generando una reducción del grosor de la fibra. De forma similar, teniendo en cuenta que el título dTex indica la finura del hilo, se percibe que la fibra suavizada y nanoestructurada es más fina que la lana virgen, ya que tiene una titulación inferior (Giraldo, 2015).

Al realizar el secado por torsión de la fibra de lana se observa que las puntas de la lana virgen se dirigen hacia la izquierda, así como las fibras de cáñamo y yute (Tabla 3). De forma contraria, a lo que sucede en las fibras suavizadas y en las fibras suavizadas y nanoestructuradas, ya que estas giran hacia la derecha, como el lino y ramio que presentan la misma tendencia (Tabla 3). Conocer el sentido de torsión de una fibra es importante para el diseñador, ya que la apariencia de la superficie desarrollada depende del sentido en el que se dirige la fibra (Giraldo, 2015).

Tabla 3. Sentido de secado por torsión de diferentes fibras naturales (SENA -Centro Nacional, 2009)

Fibra natural	Sentido de torsión
Lino	D
Ramio	D
Cáñamo	I
Yute	I

(D) sentido de torsión a la derecha, (I) sentido de torsión a la izquierda.

Por otra parte, en cuanto a la determinación del color de la fibra se obtuvo un cambio representativo en la coloración de cada una de las fibras, antes y después del tratamiento de suavizado y nanoestructurado, tal como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Coordenadas determinadas por el colorímetro (Minolta CR – Konica 400) para la determinación del color de la fibra de lana.

Fibra de lana virgen de oveja			Fibra de lana suavizada			Fibra de lana suavizada y nanoestructurada		
a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*
6,49	16,07	93,94	6,92	13,77	93,44	9,76	4,55	72,12

Al realizar los respectivos cálculos con las Ecuaciones 3, 4 y 5 se obtienen los datos condensados en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados obtenidos para la determinación del color de la fibra de lana.

Fibra de lana virgen de oveja			Fibra de lana suavizada			Fibra de lana suavizada y nanoestructurada		
c*	°HUE	IC	c*	°HUE	IC	c*	°HUE	IC
17,40	68,22	0,43	15,41	63,32	0,54	10,77	24,99	2,97
Tonalidad	Opaca		**Tonalidad**	Opaca		**Tonalidad**	Opaca	
Matiz	Amarillo Claro		**Matiz**	Blanca		**Matiz**	Café Medio	

De esta manera, se puede observar entonces que la lana suavizada presenta un color más claro respecto a la lana virgen de oveja sin tratamiento, esto es un efecto del

proceso de lavado que se tiene en cuenta para la realización de la metodología de suavizado, ya que se eliminaron las impurezas que generaban un color amarillento sobre la muestra sin tratamiento. Sin embargo, para la lana nanoestructurada el color cambia radicalmente (Figura 8), ya que presenta un matiz oscuro debido a la presencia de plata dentro de la estructura de la fibra luego de la nanoestructuración *in sit*u, provocado por la actividad fotocatalítica de la plata.

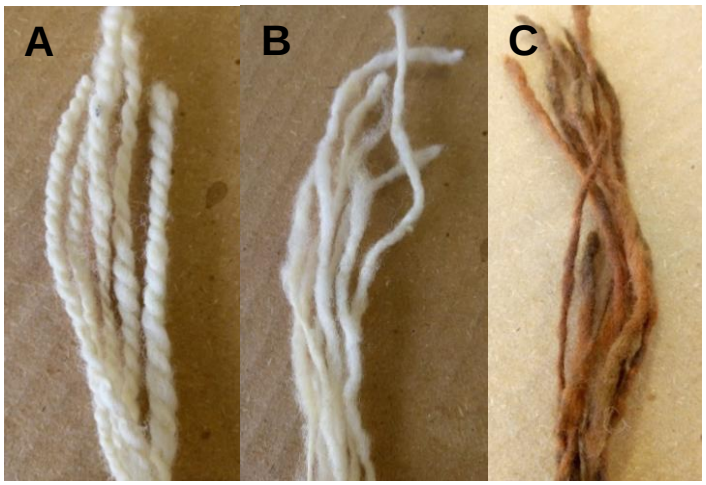


Figura 8. Fibra de (A) lana de oveja sin tratamiento, (B) lana de oveja suavizada y (C) lana de oveja suavizada y nanoestructurada con plata.

4.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA DE LANA

En la Figura 9 se observan los diferentes espectros realizados a de cada una de las fibras analizadas: lana virgen de oveja, lana suavizada y lana nanoestructurada.

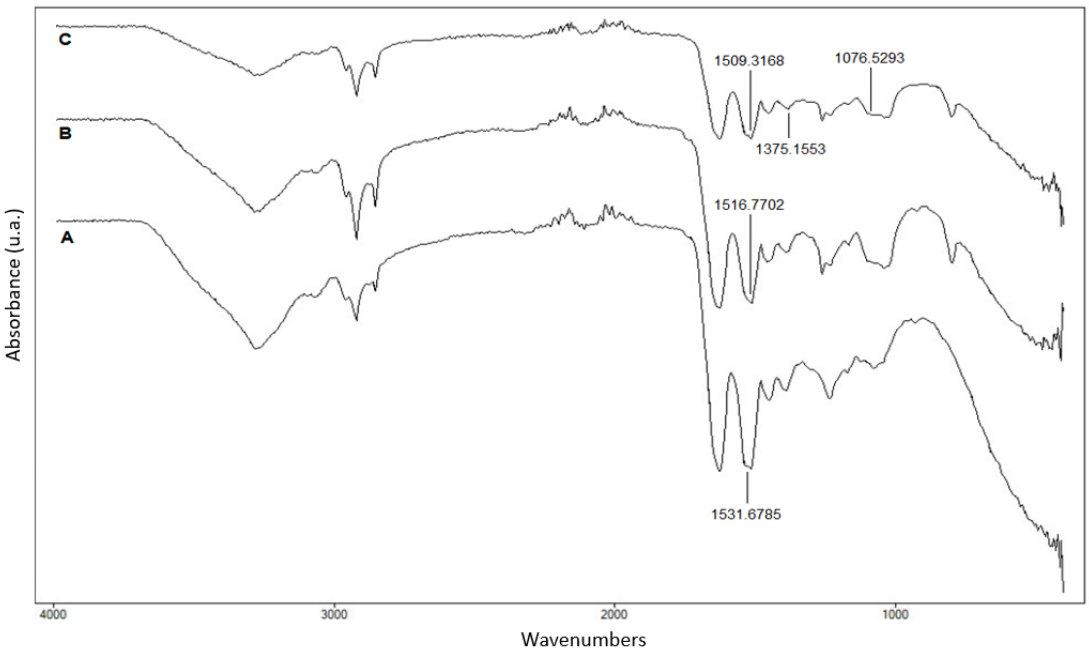


Figura 9. Análisis de espectroscopia infrarroja (FTIR) de (A) lana sin tratamiento, (B) lana después del proceso de suavizado y (C) lana suavizada y nanoestructurada.

A partir de la Figura 9, se observa la presencia de una banda en 1500 cm^{-1}, haciendo referencia a la estructura peptídica de la amida I y amida II, las cuales son las responsables de la capacidad de estiramiento de las fibras, debido a esto, la lana suavizada tiene unas propiedades mecánicas superiores a las de la lana virgen de oveja y la lana nanoestructurada, reflejada en una intensidad menor en este pico respecto a las otras dos (Vu, *et al*., 2016).

La lana virgen de oveja nanoestructurada (B), presenta una intensidad de banda en 1038 y 1380 cm^{-1}, la cual indica la unión C=N; los grupos amina que componen la fibra son precursores de la reducción de los iones de Ag, ya que el átomo de nitrógeno disminuye su potencial. Por lo tanto, la formación de AgNPs presentes en las fibras están fuertemente ligadas a la cantidad de aminas de la lana (Lu, *et al*., 2014).

Para corroborar la presencia de plata en la lana suavizada se realizó un análisis micro elemental usando espectroscopia de rayos X de energía dispersa (EDS). En la Figura 10, se muestra un pico altamente definido que demuestra la existencia de AgNPs en la superficie de la fibra.

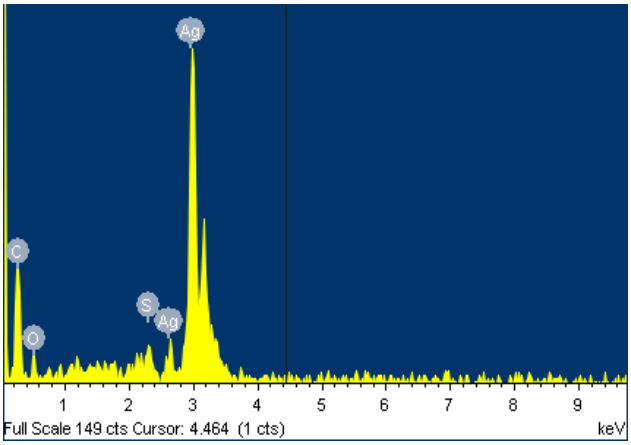


Figura 10. Composición semicuantitativa por EDS de fibras de lana suavizadas y nanoestructuradas.

4.3. MORFOLOGÍA DE LA FIBRA

A continuación, se presentan los resultados de la microscopía electrónica de barrido (SEM) obtenidos para la fibra de lana Cundiboyacense, antes y después del respectivo tratamiento.

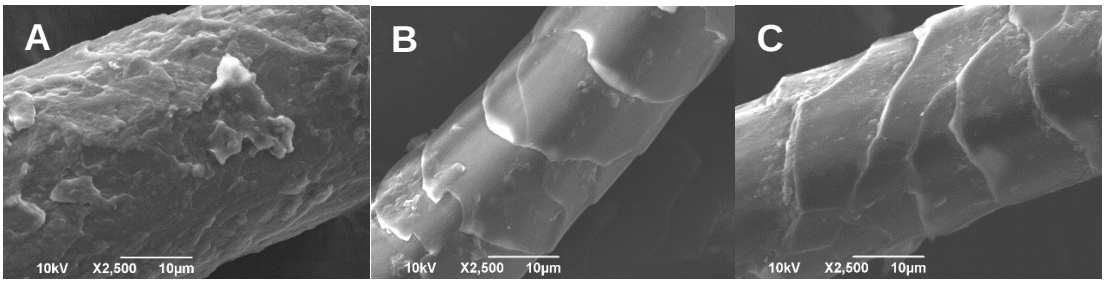


Figura 11. Micrografías de fibra de lana virgen de oveja a diferentes condiciones: (A) Lana sin tratamiento, (B) Lana después del proceso de suavizado, (C) Lana suavizada y nanoestructurada.

En la Figura 11, se observa que la fibra de lana sin tratamiento (A) tiene una estructura con escamas definidas lo cual brinda la estructura áspera convencional de la lana virgen. Respecto a la fibra con el tratamiento de suavizado (B) se observa que las escamas características se encuentran extendidas y lisas, lo que hace que la lana sea más suave respecto a la muestra inicial. Finalmente, en el resultado de la lana suavizada y nanoestructurada (C) se observa la presencia de un recubrimiento con nanopartículas sobre la fibra que envuelve las escamas alargadas de la lana previamente suavizada.

4.4. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

En cuanto al comportamiento mecánico de la fibra, se observa un aumento significativo entre las condiciones de tratamiento. Al comparar el módulo de Young (Figura 12) y el porcentaje de elongación (Figura 13) de la lana sin tratamiento y la lana suavizada se determina que la fibra después del tratamiento de suavizado presenta mejores propiedades mecánicas, ya que su módulo de Young y porcentaje de elongación son mayores respecto a la lana virgen. Sin embargo, cuando se realiza la nanoestructuración sobre la lana se observa que dichas propiedades disminuyen un poco respecto a la muestra suavizada, pero siguen siendo mayores en comparación con la lana sin tratar.

El mejoramiento de las propiedades mecánicas de la fibra suavizada posiblemente una consecuencia de la disminución de azufre, presente en la keratina, con el tratamiento de suavizado, ya que esta es la encargada de mantener la estructura de la fibra. Cuando el hilo suavizado es nanoestructurado, las propiedades mecánicas disminuyen con respecto a la fibra únicamente suavizada, pero siguen siendo mejores a las de la lana en su estado natural, pudiendo ser esto un efecto de la adición de plata nanoparticulada en los poros del filamento.

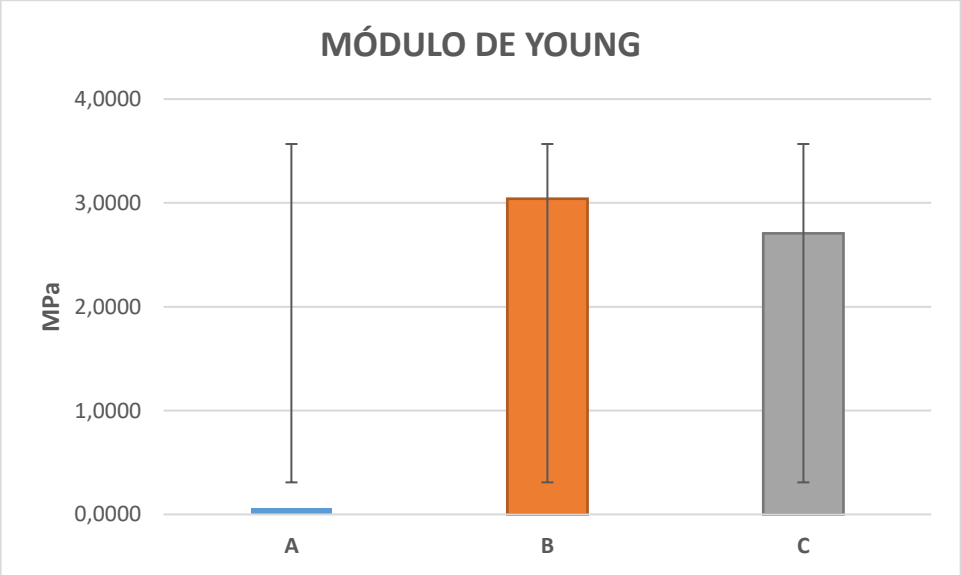


Figura 12. Comportamiento a la tracción de (A) la fibra de lana sin tratamiento, (B) lana después del proceso de suavizado y (C) lana suavizada y nanoestructurada, (*n*=*5*).

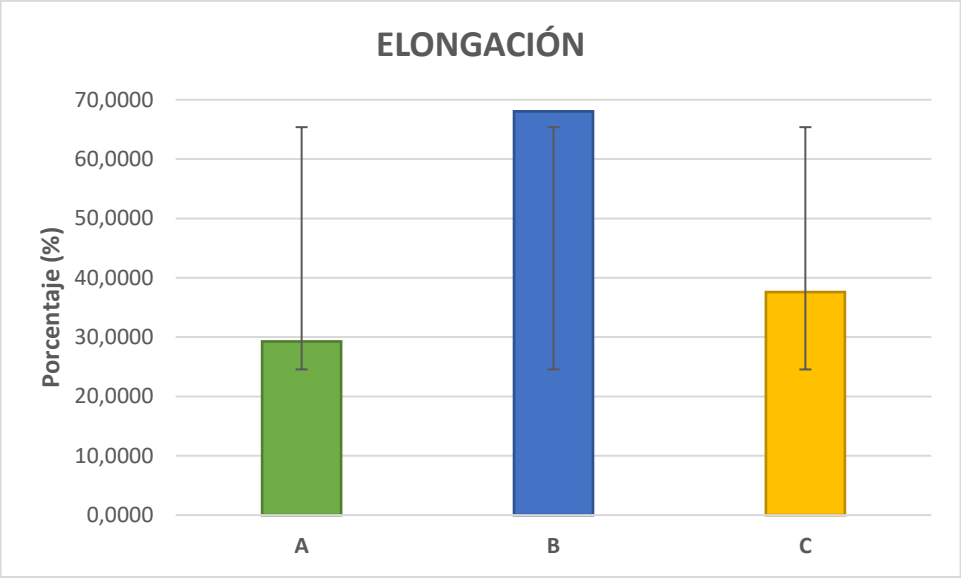


Figura 13. Comportamiento de elongación de la fibra de (A) lana sin tratamiento, (B) lana después del proceso de suavizado y (C) lana suavizada y nanoestructurada (C), (*n=5*).

Se observan grandes desviaciones estándar en las Figuras 12 y 13, debido a la morfología irregular de la fibra de lana de oveja que adquiere después de cada proceso, especialmente el de suavizado. Esto probablemente, debido al uso de reactivos químicos que abren la fibra en sus microfibras componentes dando mayor área superficial para la reacción que luego se ve beneficiada en el proceso de nanoestructuración, donde se ve que la desviación estándar es menor que en el proceso previo de suavizado.

4.5. PRUEBAS DE SUAVIDAD DE LA FIBRA

Para evaluar la suavidad de la fibra, se determinó teóricamente el coeficiente de fricción (Ecuación 8) obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Datos de los coeficientes de fricción obtenidos en la evaluación de la suavidad en la fibra de lana (*n=10*).

	Fibra de lana virgen	**Fibra de lana suavizada**	**Fibra de lana suavizada y nanoestructurada**
Cubo de madera (CM)	0,198 **+/-** 0,04	0,094 **+/-** 0,05	0,200 **+/-** 0,03
Cubo de madera con adición de lija (CML)	0,325 **+/-** 0,02	0,308 **+/-** 0,07	0,287 **+/-** 0,04

En las Figuras 14 y 15 se resumen los datos obtenidos sobre la suavidad de la fibra de lana.

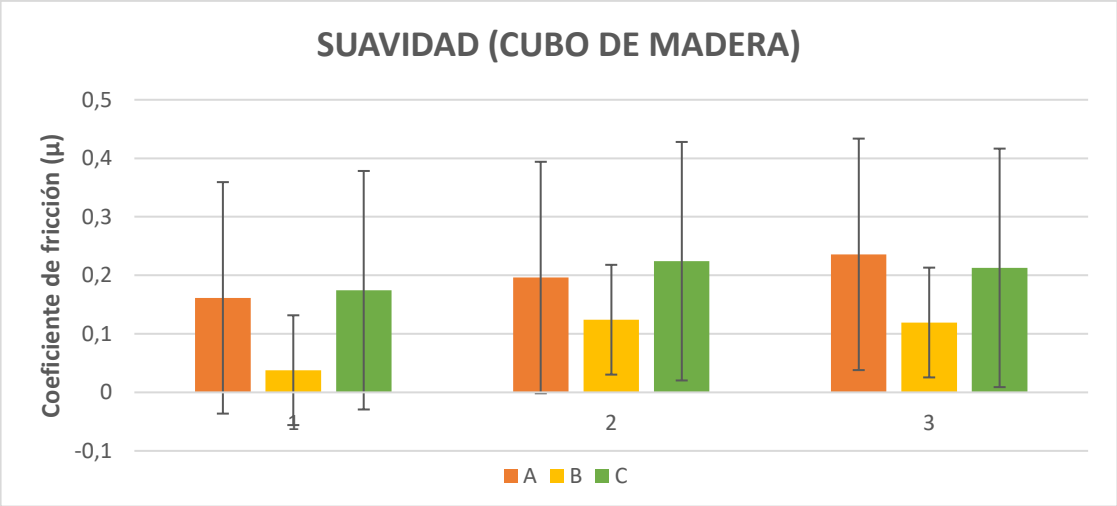


Figura 14. Coeficientes de fricción obtenidos en la interacción de la fibra con cubo de madera más una masa de100g, 200g y 300g que corresponde a 1, 2 y 3, respectivamente, de (A) lana sin tratamiento, (B) lana después del proceso de suavizado y (C) lana suavizada y nanoestructurada, (*n=10*).

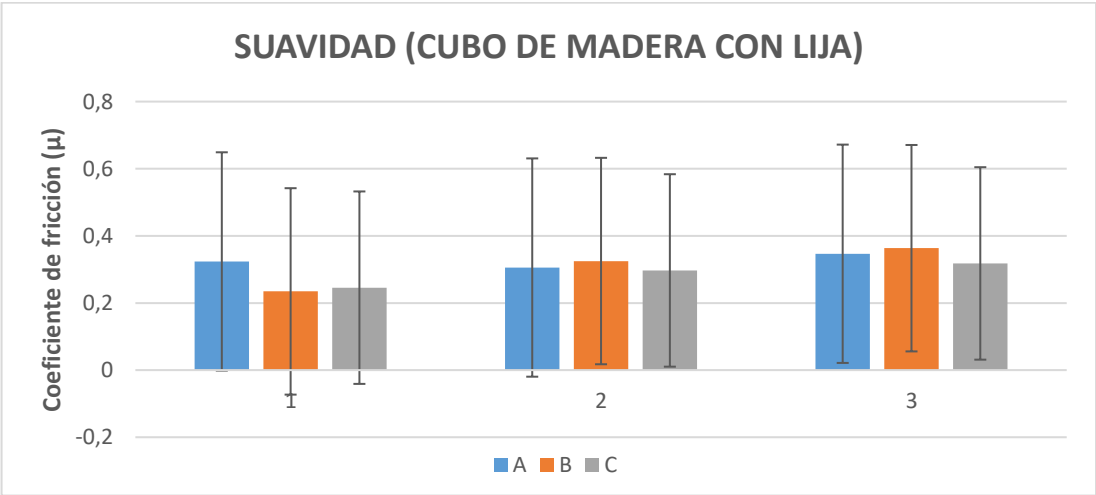


Figura 15. Coeficientes de fricción obtenidos en la interacción de la fibra con cubo de madera con adición de lija más una masa de100g, 200g y 300g que corresponde a 1, 2 y 3, respectivamente, de (A) lana sin tratamiento, (B) lana después del proceso de suavizado y (C) lana suavizada y nanoestructurada, (*n=10*).

De esta forma, se obtiene un mayor coeficiente de fricción cuando la fibra está en contacto con el cubo de madera con adición de lija respecto a la fibra en contacto con el cubo de madera únicamente para las tres muestras. Por otro lado, se observa una disminución significativa entre el coeficiente de fricción de la fibra de lana suavizada y la original, a un menor coeficiente de fricción, debido a que se realiza una menor fuerza de rozamiento entre la interacción de la fibra con los materiales; esto indica que la superficie interactuante con el cubo de madera es suave y lisa. Por consiguiente, el tratamiento realizado sobre la fibra mejora la textura y la suavidad de la misma. En la Figura 14 y 15 se puede observar unas desviaciones estándar negativas, puesto que existe una diferencia significativa entre cada una de las pruebas que realizadas (*n=10*),

siendo esto posiblemente ocasionado por la morfología irregular de la fibra de lana de oveja y el arrastre del cubo, ya que se realizó de manera manual.

4.6. PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS Y DE LAVADO DE LANA SUAVE Y NANOESTRUCTURADA

La actividad antibacteriana de las fibras suavizadas y nanoestructuradas con plata se comprobó con dos bacterias comúnmente encontradas en la piel, *P. aeruginosa* y *S. aureus*, siendo estas Gram-negativa y Gram-positiva, respectivamente.

En la Figura 15, se presentan los resultados de la exposición aproximadamente durante 30 h de las respectivas muestras; tiempo escogido teniendo en cuenta que la *S. aureus* crece en 24 horas.

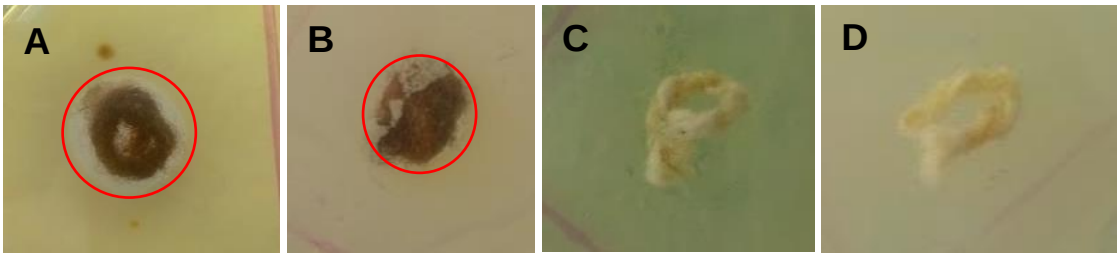
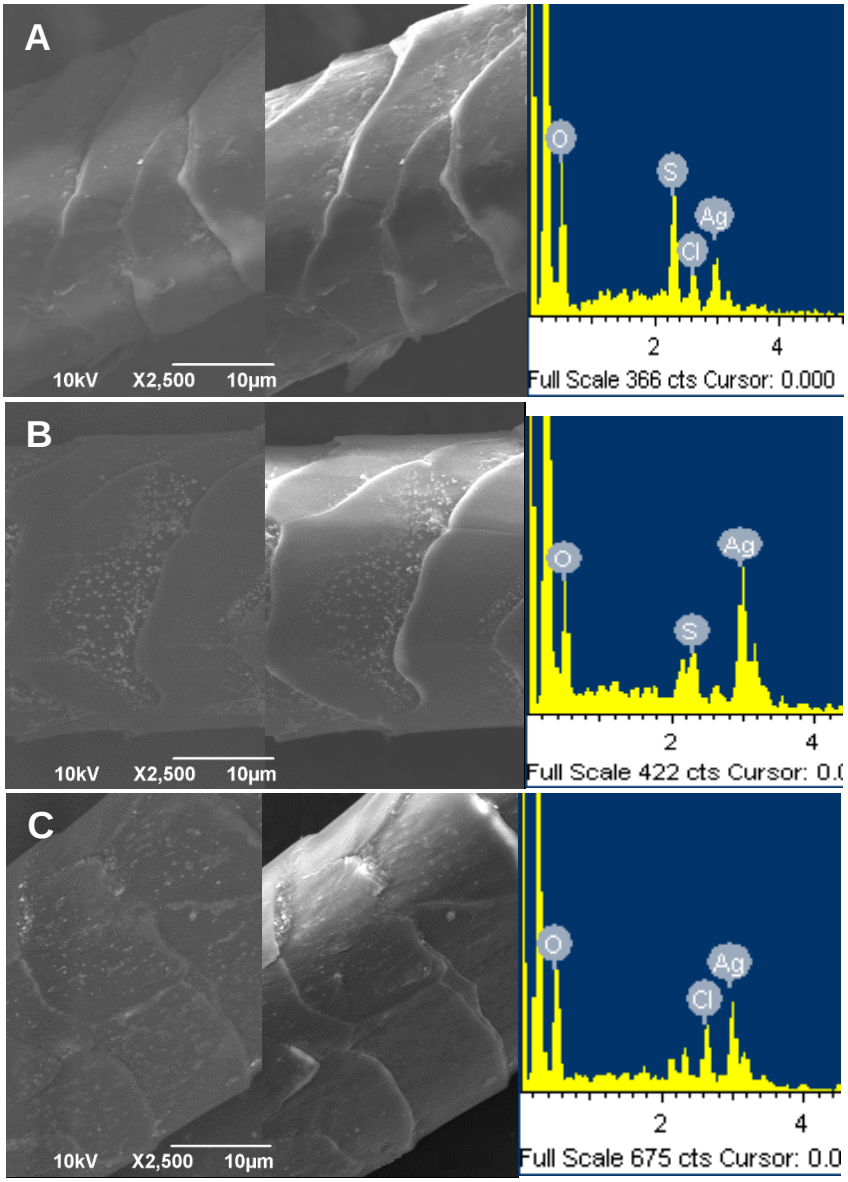


Figura 16. Efecto antibacterial de las fibras de lana suavizadas y nanoestructuradas en (A) *Pseudomonas aeruginosa* y (B) *Staphylococcus aureus*, y el efecto antibacterial de las fibras de lana virgen de oveja en (C) *Pseudomonas aeruginosa* y (D) *Staphylococcus aureus.*

Teniendo en cuenta estos resultados, en la parte C y D de la Figura 15 no se observa ninguna muestra de inhibición sobre el crecimiento de las bacterias utilizadas, ya que estas fibras no se encuentran con ningún tipo de tratamiento de nanoestructuración. Por otro lado, en la parte B se observa que el anillo de inhibición no se encuentra muy definido por lo que se dibujó una circunferencia de color rojo, posiblemente porque la visualización de las muestras se realizó en un tiempo posterior al adecuado, ya que el *S. aureus* empieza a crecer a partir de 24 h y al ser expuesto a mayor tiempo ya no se puede observar claramente el anillo de inhibición. Sin embargo, en la parte A si se presenta el anillo de inhibición del perfil de crecimiento de la bacteria utilizada alrededor de la muestra; este anillo presenta una distancia desde el centro de la muestra aproximadamente de 30 mm, lo que permite establecer que la lana tratada con AgNPs efectivamente tiene propiedades que retrasan la actividad microbiana. En la investigación realizada por Lu y colaboradores, en la cual nanoestructuran fibras provenientes del gusano de seda con nanopartículas de plata donde obtienen un halo de inhibición de 18.4 mm transcurridas 5 h cuando la seda está en contacto con *S. aureus* (Lu, *et al*., 2014).

Finalmente, las pruebas de lavado se realizaron con el fin de establecer la adherencia de las nanopartículas de plata sobre la superficie de la fibra de lana y se visualizaron las diferentes muestras por SEM (Figura 17) para rectificar su permanencia.


A
10kV X2,500 10µm
O
S
Ag
Cl
2
4
Full Scale 366 cts Cursor: 0.000
B
10kV X2,500 10µm
O
Ag
S
2
4
Full Scale 422 cts Cursor: 0.
C
10kV X2,500 10µm
O
Ag
Cl
2
4
Full Scale 675 cts Cursor: 0.0

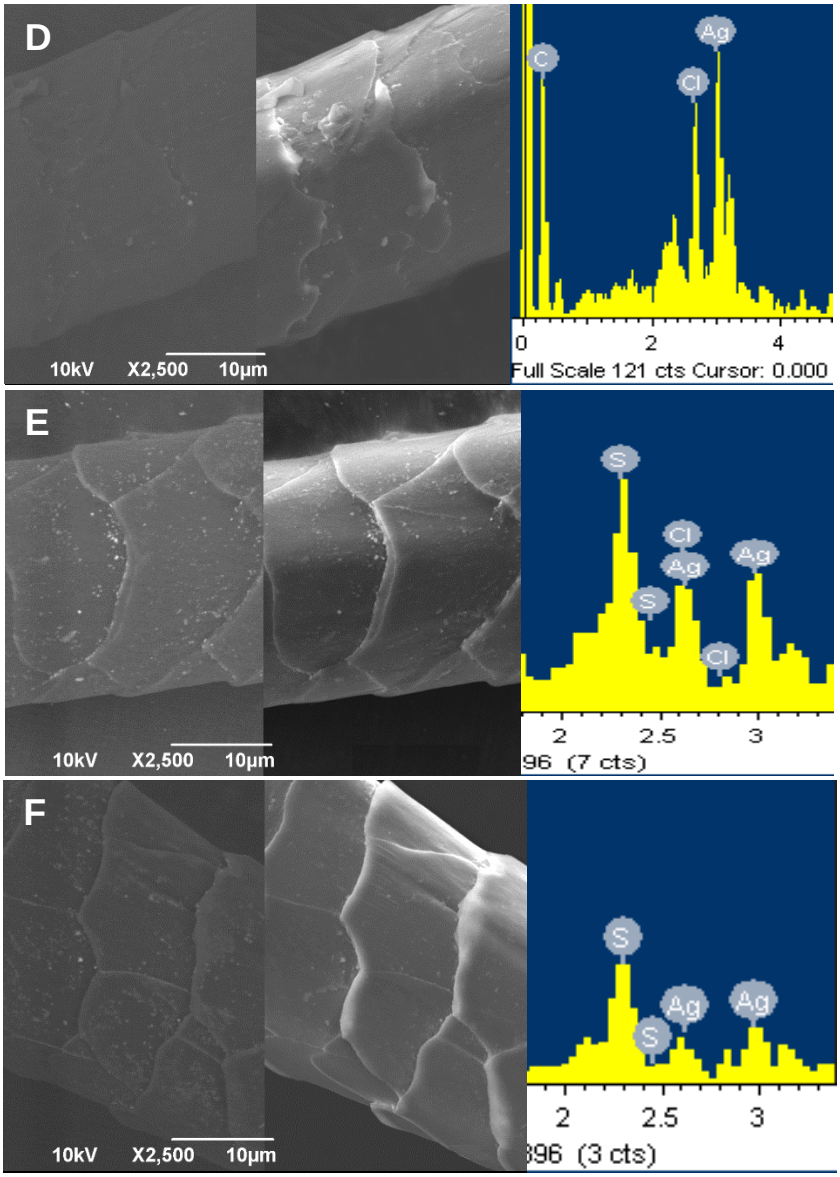


Figura 17. Micrografías donde se observa en la imagen a la izquierda BSE (*Back Scattering Electron*) y en el centro SE (*Secondary Electrons*) y en la derecha EDS (A) lana suavizada y nanoestructurada sin lavado, (B) lana suavizada y nanoestructurada con 1 lavado, (C) lana suavizada y nanoestructurada con 3 lavados, (D) lana suavizada y nanoestructurada con 5 lavados, (E) lana suavizada y nanoestructurada con 7 lavados y (F) lana suavizada y nanoestructurada con 10 lavados.

En la Figura 17, se observa como a medida que se aumentan los ciclos de lavado la cantidad de recubrimiento de plata presente en estas va disminuyendo. Sin embargo, después de diez ciclos de lavado (F) se comprueba que aún permanecen AgNPs. Posteriormente a la visualización, se decidió realizar EDS (Figura 17) para verificar la presencia de plata sobre las fibras lavadas, obteniendo como resultado que en todas las muestras después de los diferentes ciclos de lavado efectivamente permanece el compuesto adherido a la lana.

A partir de esto, se establece que el proceso de nanoestructuración de la fibra fue eficiente ya que después de los lavados se comprobó la adhesión de AgNPs sobre la fibra por medio de enlaces químicos, lo que permite que a través del lavado aún permanezcan presentes sobre la superficie, generando mayor duración de las propiedades mejoradas y menor migración al ambiente.

4.7. APLICACIÓN INDUSTRIAL

Al asumir que la pérdida de arraigo cultural es consecuencia de la baja demanda de oportunidades económicas hacia la producción de lana actualmente, es factible proponer una serie de oportunidades para la lana en sí misma como fibra natural y ancestral que amplíe las opciones de trabajo para comunidades vinculadas al tejido, y que a su vez promueva la memoria, identidad cultural frente al tejido y el tejido como un patrimonio (Dotor & Ramos, 2017).

A partir del siglo XVIII los zapateros tenían como única preocupación los factores externos del pie. Comenzando el siglo XX empezó formalmente el estudio de los movimientos humanos individuales como la secuencia que preparo Eadweard Muybridge en 1901, New York, la cual constaba de 196 placas que registraron 4.700 tomas individuales del movimiento humano, logrando hacer una investigación en conjunto con el fisiólogo Marey, cuyo modelo hasta la actualidad ha servido como ejemplo para muchos diseñadores y empresas especializadas en diferentes tipos de calzado (Dotor & Ramos, 2017).

El análisis de la fibra de lana virgen de oveja como fibra rústica ancestral y la cadena productiva artesanal llevó a realizar ensayos desde la fibra para dar características funcionales con valor agregado textil que a su vez es transferido a la superficie diseñada y elaborada en tejido plano, proponiendo como posible usuario personas de diferentes edades, con pie diabético etapa 1, el cual provoca malformaciones físicas en el pie y es por esto que su cuidado es de vital importancia para prevenir alteraciones y lesión en las extremidades inferiores del cuerpo humano (Dotor & Ramos, 2017).

La lana está constituida por una arquitectura naturalmente cálida, confortable, flexible y generosa que posiblemente brinde bienestar a las personas con pie diabético en la etapa 1, generando una buena transpiración al pie, gracias a las características fisiológicas de la construcción de la superficie textil de lana y minimizando el impacto cutáneo o posibles heridas posteriores al uso de calzado por contacto de ambas superficies. Por lo que se plantea que los pacientes con pie diabético deben permanecer siempre calzados, con los pies a una temperatura media, usar medias, el calzado debe ser hecho a la medida, con separación de dedos, en una material suave y liviano, plantilla antibacterial y suela de alta densidad para prevenir las laceraciones de planta (Dotor & Ramos, 2017).

Bajo éste esquema de guía básica para estadios tempranos y preventivo se realizó una intersección entre la química y el diseño de indumentaria, dando lugar una fibra de lana suave con propiedades antibacteriales, las cuales son beneficiosas para las personas

con pie diabético tipo 1, generando una experiencia de uso que acompañe a los usuarios, otorgándole características ideales para el pie como lo son la temperatura, antibacterialidad, diseño ergonómico hecho sobre medida y bueno un factor principal, un producto pensado en la sostenibilidad, el diseño y la funcionalidad, los cuales van directamente relacionados a generar una experiencia de diseño para un objeto funcional. En este caso la fibra de la oveja que entreteje el saber ancestral del pastoreo de ovinos, la artesanía y el diseño para generar bienestar al cimiento corporal de la humanidad los pies (Dotor & Ramos, 2017).

5. CONCLUSIONES

Se establecieron las propiedades físicas y químicas de la lana Cundiboyacense encontrando características aprovechables para una investigación detallada y un mejoramiento de la misma para su aplicación en diferentes campos, ya que las fibras suavizadas y nanoestructuradas tienen un potencial significativo a la hora de desarrollar textiles que requieran un bajo crecimiento bacteriano y una textura confortable.

Se estableció una metodología de suavizado especializada en fibras de lana virgen de oveja Cundiboyacense teniendo presente que esta reduce el efecto en el daño ambiental y aumenta la rentabilidad, proporcionando una alternativa para la disposición de esta fibra dando un valor agregado.

La luz ultravioleta (UV) es una alternativa eficiente que beneficia el crecimiento de las nanopartículas de plata sobre la superficie de la fibra, otorgando propiedades antimicrobianas al material y mejorando propiedades como el módulo de Young y la elongación, haciendo que esto valores sean mayores 1,42 y 31 veces respectivamente en comparación con los valores de la lana sin tratamiento.

La metodología de suavizado y nanoestructuración realizada a las fibras de lana virgen de oveja mejora las propiedades físicas de densidad lineal y finura, haciendo que disminuyan un 10% la masa por unidad de longitud y el título dTex (66/2) en comparación con el hilo en estado natural 0,0472 g/m y 73/2 respectivamente.

La lana de oveja proveniente del altiplano Cundiboyacense tiene una fuerte compatibilidad con el método de nanoestructuración y las nanopartículas de plata, ya que se observa una gran adherencia de éstas a la superficie de la fibra después de realizar 10 de ciclos de lavado.

La lana de oveja suavizada y nanoestructurada presenta características adecuadas para suplir la necesidad de personas con diabetes tipo 1 respecto a la comodidad e higiene en el uso de zapatos especializados, proporcionando la posibilidad de habilitar nuevos mercados para la fibra y cambiar el uso de cuero y cuerina en este tipo de calzado.

6. RECOMENDACIONES

En futuros procesos de suavizado de lana, se recomienda la evaluación de más de dos productos suavizantes con concentraciones del reactivo de interés más alta, así como la implementación de nuevos métodos de nanoestructuración para mejorar los resultados obtenidos.

7. AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue realizada gracias a la Universidad Jorge Tadeo Lozano, al Laboratorio de Nanobioingeniería y al proyecto titulado "Nanoestructuración y experimentación de fibras proteicas para superficies textiles y moda sostenible" (CC12101533) con la colaboración del Departamento de Artes y Diseño, el Programa de Diseño y Gestión de la Moda, la estudiante María Alejandra Echeverry Ocampo y el docente de estadística Miguel Ángel Rodríguez Araujo.

8. REFERENCIAS

ASTM Standard D 276 (2000) Standard Test Methods for Identification of Fibers in Textiles, Vol. 7, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM Standard D1907. (2012). Linear Density of Yarn (Yarn Number) by the Skein Method 1, (August), 1–9. https://doi.org/10.1520/D1907

ASTM Standard D 2524 - 95. (2008). Standard Test Method for Breaking Tenacity of Wool Fibers , Flat Bundle Method — 1⁄8 -. *Annual Book of ASTM Standards*, *i*(Reapproved), 1–4. http://doi.org/10.1520/D2524-13.2

Dastjerdi, R. & Montazer, M. (2010). A reviuw on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties. *Coll Surf B: Biointerfaces,* 79, 5-18.

Denning, R. (2009). Enhancing wool products using nanotechnology. *Advances in Wool Technology*, 248–264. https://doi.org/10.1533/9781845695460.2.248

Díaz, M. y Limas, C. (2016). Fibras de yanchama colorada (*Brosimum utile*) retardantes a la llama producidas a partir de nanoestructuración con hidróxido de magnesio. Tesis Ingeniería Química. Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Dotor, Angela L. & Ramos Kalmar, E. (2017). La lana: fibra ancestral como propuesta para superficie textil sostenible de calzado. bogotá, Colombia: Revista Kepes.

Elsevier B. V. (2017). Scopus. Obtenido de: https://www.scopus.com/

Gulrajani, M. L. (2013). The use of nanotechnology in the finishing of technical textiles. *Advances in the Dyeing and Finishing of Technical Textiles*, 280.

Hearle, J. W. S. (2002). Physical properties of wool. *Wool: science and technology*. Nafeie, N., Montazer, M., Nejad, N. H., & Harifi, T. (2016). Electrical conductivity of different carbon nanotubes on wool fabric: An investigation on the effects of different dispersing agents and pretreatments. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 497, 81-89.

Holme, I. (2007). Innovate technologies for high performance textiles. *Color Technol*, 123, 59-73.

Holme, I. (2009) Finishing chemicals provide technical textiles enhancements. *Journal for Asia on Textile & Apparel*, October issue.

Giraldo, J. (2015). *Manual Técnico Textil* (Edición Especial N° 4). Medellín, Colombia. Microdenier S.A., Polinylon, Grupo Gomelast & Lycra. Retrieved from http://www.microdenier.com.co/manualtecnico.pdf

Gowri, S., Almeida, L, Amorim, T., Carneiro, N., Pedro S. António, & Fátima E. M. (2010). Polymer nanocomposites for multifunctional finishing of textiles – a review. *Text Res J*, 80, 1290-1306.

Mongillo, J. F. (2007). Nanotechnology 101.

Linford M. R., Soane D. S., Offord D. A. & Were Jr W. (2005). Durable finishes for textiles, *US Patent* 6,872,424 (to Nano TexLLC, USA) 29 March 2005.

López, D. (2011). Tendencias tecnológicas ciclo de vida de producto, Industria fibra textil Confección. CIDETEXCO.

Lu, Z., Meng, M., Jiang, Y., & Xie, J. (2014). UV-assisted in situ synthesis of silver nanoparticles on silk fibers for antibacterial applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *447*, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.01.064

Lu, Z., Xiao, J., Wang, Y., & Meng, M. (2015). In situ synthesis of silver nanoparticles uniformly distributed on polydopamine-coated silk fibers for antibacterial application. *Journal of Colloid and Interface Science*, *452*. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.04.015

Ospina, J. E. (2001). Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos. Capítulo 4 fuerza de fricción. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Rodríguez M., Y. (19 de Diciembre de 2014). *Lana, una puesta de Colombia en el mundo de la moda.* Obtenido del periódico EL ESPECTADOR: https://www.elespectador.com/noticias/nacional/lana-una-apuesta-de-colombia-elmundo-de-moda-articulo-534234

SENA-Centro Nacional Textil. (2009). Control de calidad de análisis cuantitativo de fibras textiles. https://controldecalidad.wordpress.com/.

Siegfried, B. (2007). Functions, nanoparticles and commercial applications. Semester Thesis in the frame of the “Nanosafe-Textiles” project TVS Textilverband Schweiz and EPA. http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/78337/-/1=1

Soane D. S., & Offord D. A. (2002). Modified textiles and other materials and methods for their preparation. *US patent* 6,379,753 B1 (to Nano-Tex, LLC, USA), 30 April 2002.

Vu, T., Xue, Y., Vuong, T., Erbe, M., Bennet, C., Palazzo, B., Hu, X. (2016). Comparative study of ultrasonication-induced and naturally self-assembled silk fibroin-wool keratin hydrogel biomaterials. *International Journal of Molecular Sciences*, *17*(9), 1–15. https://doi.org/10.3390/ijms17091497

Xue, C-H., Jia, S-T., Zhang, J. & Ma, J-Z. (2010a). Large-area fabrication of superhydrophobic surfaces for practical applications: and overview. *Sci Technol Adv Mater,* 11, 1-15.

Xue, C-H., Wang, T-L., Zhang, J., Jia, S-T., & Tian, L-Q. (2010b). Growth of ZnO nanorod forest and characterization of ZnO-coated nylon fibers. *Mater Lett,* 64(3), 327-330.

ANEXO 1. Experimentación de la metodología de suavizado

ELECCIÓN DE REACTIVO

Tabla A1. Reactivos utilizados experimentalmente.

PRODUCTO	REACTIVO DE INTERÉS	MASA DE LANA (g)	MASA DE REACTIVO (g)	COSTO EN PESOS (1 mL)
Solución de carboximetilcisteina.	Carboximetilcisteina.	1	5,01	450
Hidromasaje capilar.	Dicosacetil hidroxietilamonio metosulfato (DHM).	1	3,30	19,81

Al comparar los datos recolectados en la Tabla A1, se observa como el producto que contiene DHM es 95% más económico y se necesita un 34% menos de cantidad en gramos que el producto con carboximetilcisteína, es por esto que se seleccionó el hidromasaje capilar como reactivo suavizante.

SELECCIÓN DE CONDICIONES (TIEMPO Y TEMPERATURA)

A partir del reactivo elegido como mejor opción para realizar el proceso de suavizado se escogió un número de muestras (*n=10*) a diferentes condiciones de temperatura y tiempo. De esta manera, se elaboró la medición del coeficiente de fricción como se presentó en el numeral 2.1 para cada condición con un cubo de madera (CM masa = 0,0548 kg) y un cubo de madera con adición de lija (CML masa = 0,0371 kg).

A continuación, se presentan las características de la experimentación para el tiempo (Tabla A2), para el tiempo más adición de temperatura (Tabla A3) con las desviaciones estándar obtenidas para cada caso y los resultados obtenidos (Tabla A4) con los promedios específicos (Tabla A5) para los cuales se estableció la metodología a utilizar.

Tabla A2. Experimentación modificando variable tiempo. *Y1= 1 hora de exposición al reactivo DHM, Y2= 2 horas de exposición al reactivo DHM, Y3= 3 horas de exposición al reactivo DHM.

n	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	σ
Y1											
m (kg)	**0,1**										
CM (kg)	0,35	0,35	0,3	0,35	0,35	0,3	0,3	0,35	0,3	0,3	0,0264
CML (kg)	0,4	0,4	0,35	0,4	0,4	0,35	0,4	0,4	0,4	0,35	0,0242
m (kg)	**0,2**										
CM (kg)	0,8	1,1	1,15	0,95	0,9	0,85	0,75	1,2	0,75	0,85	0,165
CML (kg)	0,8	0,8	0,75	0,8	0,5	0,7	0,75	0,75	0,8	0,7	0,0914
m (kg)	**0,3**										
CM (kg)	1,4	1,3	1,3	1,5	1,5	1,6	1,4	1,75	1,6	1,65	0,151
CML (kg)	1,2	1,2	1,15	1,15	1,15	1,1	1,3	1,2	1,2	1,2	0,0530
Y2											

m (kg)	**0,1**										
CM (kg)	0,15	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	0,0337
CML (kg)	0,35	0,3	0,35	0,35	0,3	0,3	0,35	0,3	0,3	0,3	0,0258
m (kg)	**0,2**										
CM (kg)	0,2	0,2	0,2	0,15	0,15	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0211
CML (kg)	0,7	0,75	0,7	0,75	0,8	0,75	0,7	0,75	0,75	0,7	0,0337
m (kg)	**0,3**										
CM (kg)	0,4	0,35	0,3	0,3	0,35	0,3	0,3	0,35	0,55	0,35	0,0762
CML (kg)	1,1	1,35	1,2	1,05	1,3	1,2	1,1	1,15	1,25	1,35	0,107
Y3											
m (kg)	**0,1**										
CM (kg)	0,05	0,1	0,05	0,1	0,1	0,05	0,025	0,1	0,05	0,05	0,0290
CML (kg)	0,3	0,3	0,25	0,35	0,3	0,25	0,35	0,35	0,3	0,3	0,0369
m (kg)	**0,2**										
CM (kg)	0,3	0,2	0,2	0,15	0,25	0,25	0,25	0,25	0,3	0,2	0,0474
CML (kg)	0,85	0,8	0,7	0,75	0,75	0,9	0,85	0,8	0,85	0,85	0,0615
m (kg)	**0,3**										
CM (kg)	0,45	0,35	0,35	0,4	0,35	0,3	0,35	0,3	0,35	0,35	0,0438
CML (kg)	1,2	1,2	1,2	1,15	1,15	1,1	1,2	1,2	1,25	1,3	0,0550

Tabla A3. Estudio de las variables tiempo y temperatura. *Y1+C= 1 hora de exposición al reactivo DHM a temperatura de 21°C, Y2+C= 2 horas de exposición al reactivo DHM a temperatura de 21°C, Y3+C= 3 horas de exposición al reactivo DHM a temperatura de 21°C.

n	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	σ
Y1 + C											
m (kg)	**0,1**										
CM (kg)	0,1	0,05	0,15	0,1	0,05	0,15	0,1	0,1	0,05	0,05	0,0394
CML (kg)	0,4	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,3	0,0236
m (kg)	**0,2**										
CM (kg)	0,35	0,25	0,25	0,25	0,25	0,35	0,25	0,25	0,35	0,25	0,0483
CML (kg)	0,75	0,65	0,7	0,85	0,8	0,7	0,9	0,7	0,85	0,7	0,0843
m (kg)	**0,3**										
CM (kg)	0,45	0,5	0,35	0,4	0,35	0,35	0,4	0,35	0,4	0,35	0,0516
CML (kg)	1,15	1,2	1,25	1,15	1,2	1,2	1,1	1,3	1,1	1,2	0,0626
Y2 + C											
m (kg)	**0,1**										
CM (kg)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,025	0,1	0,05	0,05	0,025	0,0204
CML (kg)	0,4	0,35	0,35	0,35	0,35	0,3	0,4	0,35	0,3	0,45	0,0459
m (kg)	**0,2**										
CM (kg)	0,35	0,25	0,2	0,15	0,2	0,25	0,15	0,2	0,2	0,25	0,0587
CML (kg)	0,65	0,7	0,75	0,75	0,65	0,75	0,75	0,7	0,75	0,75	0,0422
m (kg)	**0,3**										

CM (kg)	0,6	0,65	0,4	0,35	0,4	0,4	0,4	0,55	0,4	0,5	0,1029
CML (kg)	1,15	1,15	1,05	1,15	1,15	1,05	1,05	1,1	1,2	1,15	0,0537
Y3 + C											
m (kg)	**0,1**										
CM (kg)	0,05	0,05	0,025	0,1	0,05	0,05	0,1	0,05	0,05	0,05	0,0237
CML (kg)	0,35	0,3	0,35	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,35	0,0242
m (kg)	**0,2**										
CM (kg)	0,35	0,25	0,3	0,3	0,25	0,3	0,3	0,35	0,35	0,35	0,0394
CML (kg)	0,7	0,75	0,7	0,8	0,8	0,75	0,8	0,75	0,7	0,8	0,0438
m (kg)	**0,3**										
CM (kg)	0,45	0,4	0,4	0,45	0,4	0,45	0,4	0,4	0,4	0,4	0,0242
CML (kg)	1,15	1,1	1,2	1,3	1,25	1,15	1,2	1,3	1,2	1,15	0,0667

Respecto a estos resultados, se observa menor desviación estándar en los datos obtenidos para 3 horas de exposición a temperatura de 21°C.

Tabla A4. Resultados obtenidos para cada condición del coeficiente de fricción.

Cubo	m(kg)	Fr(N)	N(N)	u	Cubo	m(kg)	Fr(N)	N(N)	u
Y1					**Y1 + C**				
CM	0,1	0,325	1,517	0,214	CM	0,1	0,09	1,517	0,059
	0,2	0,93	2,497	0,372		0,2	0,28	2,497	0,112
	0,3	1,5	3,477	0,431		0,3	0,39	3,477	0,112
CML	0,1	0,385	1,344	0,287	CML	0,1	0,35	1,344	0,260
	0,2	0,735	2,324	0,316		0,2	0,76	2,324	0,327
	0,3	1,185	3,304	0,359		0,3	1,185	3,304	0,359
Y2					**Y2 + C**				
CM	0,1	0,085	1,517	0,056	CM	0,1	0,05	1,517	0,033
	0,2	0,19	2,497	0,076		0,2	0,22	2,497	0,088
	0,3	0,355	3,477	0,102		0,3	0,465	3,477	0,134
CML	0,1	0,32	1,344	0,238	CML	0,1	0,36	1,344	0,268
	0,2	0,735	2,324	0,316		0,2	0,72	2,324	0,310
	0,3	1,205	3,304	0,365		0,3	1,12	3,304	0,339
Y3					**Y3 + C**				
CM	0,1	0,0675	1,517	0,044	CM	0,1	0,0575	1,517	0,038
	0,2	0,235	2,497	0,094		0,2	0,31	2,497	0,124
	0,3	0,355	3,477	0,102		0,3	0,415	3,477	0,119
CML	0,1	0,305	1,344	0,227	CML	0,1	0,315	1,344	0,234
	0,2	0,81	2,324	0,349		0,2	0,755	2,324	0,325
	0,3	1,195	3,304	0,362		0,3	1,2	3,304	0,363

Tabla A5. Resultados promedio de coeficientes de fricción.

Cubo	u Promedio	Cubo	u Promedio
Y1		**Y1 + C**	
CM	0,339	CM	0,095
CML	0,321	CML	0,315
Y2		**Y2 + C**	
CM	0,078	CM	0,085
CML	0,306	CML	0,306
Y3		**Y3 + C**	
CM	0,08	CM	0,094
CML	0,312	CML	0,308

Se observó que los coeficientes de fricción en las fibras que no tienen aplicación de temperatura son menores para CM que para CML y decrecen a mayor tiempo de aplicación (Y3). Por otro lado, se establece que los coeficientes de fricción de las muestras que se exponen a temperatura no varían mucho entre sí; sin embargo, son menores respecto a mayor tiempo de exposición, razón por la cual se escoge como características óptimas para la metodología planteada la exposición de la fibra durante 3 h más de temperatura.