

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

ESCUELA DE POSGRADO



TESIS

“Estudio de las Interacciones Físico Químicas del Algodón y los Óxidos de Cobre en los Textiles Funcionalizados con Propiedades Antimicrobianas”

**PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN:
FÍSICA**

ELABORADO POR:

LUZ ESMERALDA ROMÁN MENDOZA

Asesor Local:

DR. JOSÉ LUIS SOLÍS VELIZ

Asesor Externo:

DR. ENRIQUE DANIEL GOMEZ

LIMA, PERÚ

2023

DEDICATORIA

Con mucho amor a mis padres Benedito Román y Leonor Mendoza.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y Jesucristo por mostrarme todos los días su grandeza, por ser mi fortaleza, mi refugio, por sus bendiciones concedidas en la etapa del doctorado.

A mi familia, especialmente a mis padres Benedicto y Leonor y mis hermanos Juan José, Kimm, Manuel y Karoll por su compañía, paciencia y apoyo incondicional.

Agradezco al Prof. Dr. José Solís y Prof. Dra. Mónica Gómez por la confianza depositada en mi persona, por su exigencia, amistad y dedicación a mi formación profesional y humano.

También me gustaría agradecer a la M.Sc. Ing. Carmen Uribe y M.Sc. Dora Maúrtua por el apoyo brindado en esclarecer mis dudas.

A mis compañeros de laboratorio Cleny Villalva, Andrés Reyes y Walter Poma quienes me ayudaron a culminar las pruebas de laboratorio.

Al Prof. Dr. Enrique Gómez por su coasesoría y por facilitarme el acceso a las instalaciones del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Estatal de Pensilvania – Estados Unidos y realizar los análisis de XPS, MEB, TOF-SIMS e ICP. Al Prof. Dr. Francisco-Paraguay del Centro de Investigación en Materiales Avanzados – Cimav – México, por los análisis de XPS. A los profesores Dr. Gerardo Cruz y M.Sc. Liliana Solís de la Universidad Nacional de Tumbes y a la profesora M.Sc. Dora Maúrtua de la Universidad Peruana Cayetano Heredia por el ingreso a sus laboratorios y realizar las evaluaciones microbiológicas.

Agradezco también al CONCYTEC/FONDECYT/BM convenio no. 05-2018-FONDECYT/BM por la beca del doctorado.

PREFACIO

La realización de esta tesis es producto del trabajo de investigación que se llevó a cabo en la Facultad de Ciencias y la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería, en el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Estatal de Pensilvania – Estados Unidos, en la Facultad de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Tumbes y en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de la Universidad Peruana Cayetano Heredia, bajo la supervisión del Prof. Dr. José Solís, Prof. Dra. Mónica Gómez, M.Sc. Ing. Carmen Uribe, Prof. Dr. Enrique Gomez, Prof. Dr. Gerardo Cruz, Msc. Liliana Solís y la M.Sc. Dora Maurtua.

Parte del trabajo de investigación ha sido reportado en:

a) Artículos publicados:

- Román L.E., Amézquita M.J., Uribe C.L., Maurtua D.J., Costa S.A., Costa S.M., Keiski R., Solís J.L., Gómez M.M., In situ growth of CuO nanoparticles onto cotton textiles, *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* 11 (2020) 025009.
- Román L.E., Gomez E.D., Solís J.L., Gómez M.M., Antibacterial cotton fabric functionalized with copper oxide nanoparticles, *Molecules* 25 (2020) 5802.
- Roman, L. E., Villalva, C., Uribe, C., Paraguay-Delgado, F., Sousa, J., Vigo, J., Vera, C. M., Gomez, M. M., & Solis, J. L. (2022). Textiles functionalized with copper oxides: A sustainable option for prevention of COVID-19, *Polymers (Basel)*, 14 (15) 3066.

b) Artículo en redacción:

- Luz E. Román, Enrique Gomez, Francisco Paraguay-Delgado, Mónica M. Gómez, José L. Solís., Surface chemical analysis of cotton fabric functionalized with copper oxides.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: PROTOCOLO DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.1. Planteamiento del problema.....	16
1.2. Antecedentes	19
1.2.1. Antecedentes nacionales	21
1.2.2. Antecedentes internacionales	22
1.3. Identificación y descripción del problema de estudio.....	24
1.4. Formulación del problema	24
1.4.1. Problema general.....	25
1.4.2. Problemas específicos	25
1.5. Justificación	25
1.6. Objetivos	26
1.6.1. Objetivo general	26
1.6.2. Objetivos específicos	26
1.7. Hipótesis y variables	27
1.7.1. Hipótesis general	27
1.7.2. Hipótesis específicas	27
1.7.3. Variables	27
1.8. Metodología	28
1.8.1. Tipo de investigación	28
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	29
2.1. Bases teóricas.....	29
2.1.1. Textiles técnicos o textiles funcionales.....	29
2.1.1.1. Áreas de aplicación de los textiles técnicos	30
2.1.2. Acabados textiles	44
2.1.2.1. Acabados físicos o mecánicos.....	45
2.1.2.2. Acabados químicos	47
2.1.2.3. Acabados biotecnológicos.....	49
2.1.2.4. Acabados de protección al usuario y textiles	51
2.1.2.5. Otros tipos de acabados.....	53
2.1.3. Fibras textiles	56
2.1.3.1. Fibra de algodón.....	57

2.1.3.2.	Estructura de la fibra de algodón	58
2.1.3.3.	Propiedades químicas del algodón	59
2.1.3.4.	Composición química del algodón.....	60
2.1.4.	Óxidos empleados en acabados textiles	61
2.1.4.1.	Óxidos de cobre	62
2.1.4.2.	Formación de complejos metálicos.....	63
2.1.4.3.	Reacción del ion de cobre (II) en solución	66
2.1.4.4.	Mecanismo de reacción del óxido de cobre	67
2.1.5.	Técnicas de caracterización.....	68
2.1.5.1.	Espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).....	68
2.1.5.2.	Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS).....	70
2.1.5.3.	Espectrometría de masas de iones secundarios en el tiempo de vuelo (TOF-SIMS)	73
2.1.5.4.	Microscopía electrónica de barrido (MEB)	76
2.1.6.	Colorimetría	77
2.2.	Marco conceptual.....	79
CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN		80
3.1.	Materiales.....	80
3.2.	Funcionalización del textil con CuO _x	80
3.2.1.	Toma de muestras	82
3.3.	Características colorimétricas del textil	82
3.4.	Caracterización del textil	83
3.4.1.	ICP-MS	83
3.4.2.	XPS	83
3.4.3.	TOF-SIMS.....	84
3.4.4.	MEB	84
3.5.	Evaluación microbiológica	84
3.6.	Pruebas de resistencia al lavado del textil.....	85
3.7.	Control de calidad textil.....	85
3.7.1.	Propiedades físicas	86
3.7.1.1.	Ligamento del tejido	86
3.7.1.2.	Título del hilo extraído del tejido.....	86

3.7.1.3. Densidad de hilos del tejido	86
3.7.2. Pruebas de solidez del color	87
3.7.2.1. Solidez al lavado	87
3.7.2.2. Solidez al sudor	87
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	89
4.1. Funcionalización del textil con CuO _x	89
4.2. Características colorimétricas del textil	90
4.3. Caracterización del textil	93
4.3.1. ICP-MS	93
4.3.2. XPS	96
4.3.3. TOF-SIMS.....	105
4.4. Evaluación microbiológica	108
4.5. Pruebas de resistencia al lavado del textil.....	114
4.6. Control de calidad textil.....	118
4.6.1. Propiedades físicas	118
4.6.1.1. Ligamento del tejido	118
4.6.1.2. Título del hilo extraído del tejido.....	119
4.6.1.3. Densidad de hilos del tejido	119
4.6.2. Pruebas de solidez del color	120
4.6.2.1. Solidez al lavado	120
4.6.2.2. Solidez al sudor	121
CAPÍTULO V: CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	122
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	124
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	125
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
ANEXOS	145
Anexo A – Pruebas preliminares de biodegradabilidad del tejido	145
Anexo B – Matriz de consistencia.....	148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química de la fibra de algodón.....	61
Tabla 2. Nomenclatura de las muestras textiles antes y durante su extracción en el proceso de funcionalización de con CuO _x	89
Tabla 3. Espectros principales de picos del C1s basadas en sus energías de enlace para el tejido no-funcionalizado y tejidos extraídos en el proceso de funcionalización con CuO _x	97
Tabla 4. Resultados del porcentaje de reducción bacteriana para <i>Escherichia coli</i> (ATCC 25922) y <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (ATCC 10145) de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO _x después de 5, 15 y 25 ciclos de lavados, evaluados según norma ASTM E2149:2013.....	118
Tabla 5. Título del hilo en sistema inglés (Ne) del tejido no-funcionalizado y de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO _x , según norma ISO/FDIS 7211-5:2020.....	119
Tabla 6. Densidad de hilos del tejido no-funcionalizado y de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO _x , según norma ABNT NBR 10588:2015.	120
Tabla 7. Resultados de la evaluación de solidez al lavado, según norma ISO 105-C06:2010 – Prueba B1M con la E.G.T.C. y E.G.C.C.	121
Tabla 8. Resultados de la evaluación de solidez al sudor, según norma ISO 105-E04:2013 con la E.G.T.C. y E.G.C.C.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Número de brotes de IAAS entre los años de 2010 al 2021.	17
Figura 2. Áreas de aplicación de los textiles técnicos.	30
Figura 3. Esquema de funcionalización textil por el método: (a) <i>in situ</i> y (b) <i>ex situ</i>	55
Figura 4. Clasificación de las fibras textiles en naturales y manufacturadas.	57
Figura 5. (a) Esquema de la estructura y (b) micrografía electrónica de barrido de una fibra de algodón.	59
Figura 6. (a) Unidades de β -D-glucopiranososa y; (b) estructura molecular de la fibra de algodón.	60
Figura 7. Estructura cristalina: (a) cúbica del Cu_2O y (b) monoclinica del CuO . Las esferas rojas representan oxígeno, las marrones cobre y las líneas verdes la celda unitaria.	63
Figura 8. Esquema de un espectrómetro de masas por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS).	70
Figura 9. Representación esquemática de un espectrofotómetro de fotoelectrones de rayos X.	72
Figura 10. Esquema del proceso de emisión de fotoelectrones y electrones Auger.	73
Figura 11. Esquema de formación de un ion secundario.	74
Figura 12. Componentes principales de un espectrómetro TOF-SIMS.	75
Figura 13. Esquema de un microscopio electrónico de barrido.	77
Figura 14. Espacio de color CIE $L^*a^*b^*$	78
Figura 15. Esquema del proceso de funcionalización de tejidos de algodón con CuO_x por el método de teñido textil de agotamiento.	81
Figura 16. Toma de muestras de tejidos durante el proceso de funcionalización: (1) a 25°C con sal de cobre; (2) a 60°C con sal de cobre y NaOH ; (3) a 90°C con sal de cobre y NaOH ; (4) a 70°C funcionalizado con CuO_x ; y (5) funcionalizado con CuO_x más enjuagues y neutralizado.	82
Figura 17. Muestras del tejido no-funcionalizado y de los tejidos extraídos durante el proceso de funcionalización con CuO_x a partir de sales de cobre de: (a) acetato, (b) nitrato y (c) sulfato.	90
Figura 18. Coordenadas de color CIE $L^*a^*b^*$ del tejido no-funcionalizado y de tejidos extraídos en el proceso de funcionalización con CuO_x a partir de sales de cobre de acetato, nitrato y sulfato: (a) L^* y (b) a^* y b^*	92
Figura 19. Cantidad de Cu medidos por ICP-MS en soluciones de sales de cobre, tejido no-funcionalizado y tejidos extraídos en el proceso de funcionalización con CuO_x a partir de acetato, nitrato y sulfato de cobre.	95
Figura 20. Amplio espectro XPS del tejido no-funcionalizado y tejidos extraídos en el proceso de funcionalización con CuO_x usando sal de cobre: (a) acetato, (b) nitrato y (c) sulfato.	96

Figura 21. Espectros XPS de C1s del tejido no-funcionalizado y tejidos extraídos a 25°C con sal de acetato, nitrato y sulfato de cobre (etapa de agotamiento primario).	99
Figura 22. Espectros XPS de C1s del tejido no-funcionalizado y de tejidos extraídos después de añadir NaOH, incremento de temperatura a 90°C y enfriamiento a 70°C (etapa de agotamiento secundario).	100
Figura 23. Espectros XPS de C1s del tejido no-funcionalizado y de los tejidos funcionalizados con CuO _x más enjuagues y neutralizado (etapa de procesos posteriores).	101
Figura 24. Espectros XPS de picos Cu 2p del tejido no-funcionalizado y de tejidos: a 25°C con sal de cobre (a); después de añadir NaOH, incremento de temperatura a 90°C y enfriamiento a 70°C (b); y funcionalizados con CuO _x más enjuagues y neutralizado.	105
Figura 25. Espectro TOF-SIMS de iones positivos del tejido no-funcionalizado y de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizadas con CuO _x en los rangos m/z de: (a) 30 – 140; (b) 62,7 – 63,2 y; (c) 92,6 – 107,2.....	106
Figura 26. Micrografía de MEB del tejido no funcionalizado en magnificaciones: (a) 5kX; (b) 120kX.....	107
Figura 27. Micrografías de MEB de los tejidos funcionalizados con CuO _x : tejido A5 (a,b); tejido N5 (c,d) y tejido S5 (e,f) en magnificaciones de 25kX y 120kX.	108
Figura 28. Resultados del porcentaje de reducción bacteriana para <i>Escherichia coli</i> (ATCC 25922) y <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (ATCC 10145) del tejido no-funcionalizado y de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO _x , evaluados según norma ASTM E2149:2013.	109
Figura 29. Resultados de las placas para: (a) <i>Escherichia coli</i> (ATCC 25922) y (b) <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (ATCC 10145). En ambos casos fotografía (1) tejido no funcionalizado y (2) tejidos funcionalizados con CuO _x a partir de las sales de acetato, nitrato y sulfato de cobre.	110
Figura 30. Diagrama de los mecanismos de la actividad antimicrobiana de materiales textiles funcionalizados con NPs de CuO: (a) liberación de iones de cobre; (b) contacto de las NPs de CuO con la bacteria y; (c) especies reactivas de oxígeno.	111
Figura 31. Variaciones porcentuales en las coordenadas de color CIE L*a*b*. (a) L* y (b) a* y b* de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO _x en función de ciclos de lavado doméstico.	115
Figura 32. Contenidos de Cu en tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO _x antes y después de 5, 15 y 25 ciclos de lavados obtenidos por ICP-MS.	117
Figura 33. Esquema del ligamento sarga 2/1 del tejido no-funcionalizado y de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO _x , según norma ABNT NBR 12996:1993.	119

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	: Asociación Brasileña de Normas Técnicas
ASTM	: <i>American Society for Testing and Materials</i>
ATCC	: <i>American Type Culture Collection</i>
E.G.C.C	: Escala de Grises para Cambio de Color
E.G.T.C	: Escala de Grises para Transferencia de Color
EPPs	: Equipo de Protección Personal
FDIS	: <i>Final Draft International Standard</i>
HT	: <i>High Temperature</i>
IAAS	: Infecciones Asociadas a la Atención de Salud
ICP-MS	: <i>Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry</i>
ISO	: <i>International Organization for Standardization</i>
LTP	: <i>Low Temperature Plasma</i>
MEB	: Microscopio Electrónico de Barrido
NBR	: Norma Brasileira
Ne	: <i>Number English</i>
OFF	: Con UV incluido
PET	: Polietileno tereftalato
s.m.t	: sobre la masa del textil
SARS-CoV-2	: Síndrome Respiratorio Agudo Severo Coronavirus 2
SAV	: Área de apertura pequeña
SCI	: Especularidad incluida
TOF-SIMS	: <i>Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry</i>
WOB	: <i>Without Optical Brightener</i>
XPS	: <i>X-Ray Photoelectron Spectroscopy</i>

RESUMEN

La aparición y propagación de nuevos microorganismos que causan enfermedades como el COVID-19 y las enfermedades ya existentes como las Infecciones Asociadas a la Atención en Salud (IAAS), son problemas de salud pública y privada a nivel mundial. El uso de tejidos de algodón con propiedades antimicrobianas funcionalizados con óxidos de cobre (CuO_x) como el óxido cuproso (Cu_2O) y/o óxido cúprico (CuO), podrían ser empleados para prevenir y disminuir la propagación de agentes patógenos como bacterias, virus y hongos. El objetivo del presente trabajo fue realizar un estudio de la interacción físico-química entre los CuO_x y la celulosa de la fibra de algodón de un tejido antimicrobiano. Los CuO_x se sintetizaron usando tres diferentes sales de cobre (acetato de cobre monohidratado ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), nitrato de cobre trihidratado ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)) y un agente reductor (hidróxido de sodio (NaOH)). La funcionalización *in situ* de tejidos con CuO_x fue llevado a cabo por el método de teñido de agotamiento, usando el equipo textil de alta temperatura (HT – High temperatura) de la marca Rapid, modelo Eco Dyer-24. Para la funcionalización fueron usados 2% s.m.t. (sobre la masa del textil) de la sal precursora de cobre y 0,5 g/L de NaOH . Los tejidos de algodón obtenidos fueron caracterizados por espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS), espectrometría de masas de iones secundarios en el tiempo de vuelo (TOF-SIMS) y microscopía electrónica de barrido (MEB), además, se evaluaron sus características colorimétricas, propiedades físicas y solidez de color, asimismo, se analizó sus propiedades antimicrobianas según la norma ASTM E2149:2013 antes y después de lavados. Los resultados mostraron que los CuO_x cambiaron la tonalidad amarilla del tejido no-funcionalizado a pardo rojizo. La cantidad inicial de cobre en los tejidos de algodón fue de 0,009%, el cual después de la funcionalización a partir de acetato, nitrato y sulfato cobre aumentó a 40, 32 y 27%, respectivamente. Existe un tipo de interacción química entre los grupos hidroxilos de la celulosa del algodón y el cobre, asimismo, la superficie de los tejidos funcionalizados tiene una mezcla de Cu_2O y CuO . Además de ello, los tejidos funcionalizados con CuO_x inhibieron el crecimiento bacteriano de *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa* en más del 99% antes y después de 5, 15 y 25 lavados.

Palabras clave: Óxidos de cobre, funcionalización, tejido de algodón, interacción físico-química, antimicrobiano.

ABSTRACT

The appearance and spread of new microorganisms that cause diseases such as COVID-19 and existing diseases such as Healthcare-Associated Infections (HAIs), are public and private health problems worldwide. The use of cotton fabrics with antimicrobial properties functionalized with copper oxides (CuO_x) like cuprous oxide (Cu_2O) and/or cupric oxide (CuO), could be used to prevent and reduce the spread of pathogens such as bacteria, viruses and fungi. The objective of the present work was to carry out a study of the physical-chemical interaction between CuO_x and cellulose of cotton fiber of an antimicrobial fabric. The CuO_x were synthesized using three different copper salts (copper acetate monohydrate ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), copper nitrate trihydrate ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), copper sulfate pentahydrate ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)) and a reducing agent (sodium hydroxide (NaOH)). The *in situ* functionalization of fabric with CuO_x was carried out via the exhaust dyeing method using the High-Temperature (HT) textile equipment of brand Rapid Eco Dyer model ECO-24. For functionalization, 2% s.m.t. (on the mass of the textile) of the precursor copper salt and 0.5 g/L of NaOH were used. For functionalization, 2% owf (on-weight-fabric) of the precursor copper salts and 0.5 g/L of NaOH were used. The obtained cotton fabrics were characterized by Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP-MS), X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry (TOF-SIMS) and Scanning Electron Microscopy (SEM), in addition, their colorimetric characteristics, physical properties and colorfastness were evaluated, likewise, their antimicrobial properties were analyzed according to ASTM E2149:2013 standard before and after washing. The results showed that the CuO_x changed the yellow hue of the non-functionalized fabric to reddish brown. The initial amount of copper in the cotton fabrics was 0.009%, which after functionalization from copper acetate, nitrate and sulfate increased to 40, 32 and 27%, respectively. There is a type of chemical interaction between hydroxyl groups of cotton cellulose and copper, likewise, the surface of the functionalized fabrics has a mixture of Cu_2O and CuO . Furthermore, the functionalized fabrics with CuO_x inhibited bacterial growth of *Escherichia coli* and *Pseudomonas aeruginosa* by more than 99% before and after 5, 15 and 25 washes.

Keywords: Copper oxides, functionalization, cotton fabric, physical-chemical interaction, antimicrobial

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades infecciosas como el reciente COVID-2019 y las asociadas a la atención en salud (IAAS) son un peligro constante para la salud mundial y mortalidad de los seres humanos. Estas infecciones se pueden prevenir y tratar bajo el riguroso cumplimiento de diferentes protocolos establecidos por los centros de salud, organizaciones nacionales e internacionales especialistas en el tema. Asimismo, el desarrollo y uso de tejidos de algodón con propiedades antimicrobianas funcionalizados con óxidos de cobre (CuO_x) pueden ser empleados en el sector salud, educación, limpieza, agropecuario y militar con la finalidad de prevenir y disminuir el contagio de enfermedades infecciosas.

En la literatura hay reportes sobre la durabilidad de las propiedades antimicrobianas de los tejidos funcionalizados con CuO_x frente a ciclos de lavados domésticos. En este contexto, el objetivo general de la presente investigación es ahondar en el estudio de la interacción físico-química entre la celulosa de algodón y los CuO_x de un tejido antimicrobiano obtenido por el método de teñido de agotamiento funcionalizado con estos mismos óxidos. Con este propósito se pretende aportar una herramienta para mejorar y controlar el proceso de funcionalización, puesto que, con el avance de la tecnología, es posible fabricar nanopartículas del tamaño y forma deseados con diversas propiedades funcionales.

La tesis doctoral está estructurada en siete capítulos, a continuación, se detalla el contenido de cada uno de ellos:

En el capítulo I se representan el protocolo de la investigación relacionados con el planteamiento del problema, antecedentes, formulación del problema, su justificación y objetivos. Del mismo modo, se describen las hipótesis, variables y el enfoque metodológico.

El capítulo II constituye el marco teórico que abarca las bases teóricas para el desarrollo de la tesis de investigación y el marco conceptual.

En el capítulo III se aborda el desarrollo del trabajo de investigación que consta de la descripción de los materiales y métodos para funcionalizar tejidos de algodón con CuO_x . Igualmente se exponen los métodos de la evaluación colorimétrica, caracterización del textil, evaluación microbiológica, resistencia al lavado y controles de calidad.

El capítulo IV presenta la discusión e interpretación de los resultados obtenidos en la funcionalización de tejidos de algodón con CuO_x , medición de las características de color, caracterizaciones del textil, evaluación microbiológica, resistencia de los tejidos a los lavados domésticos y controles de calidad.

El capítulo V se plantea la contrastación de las hipótesis; y finalmente en los capítulos VI y VII se sintetiza las conclusiones y se incluyen las recomendaciones para futuros trabajos de investigación.

CAPÍTULO I: PROTOCOLO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El aumento de contaminantes dañinos provocados por las actividades antropogénicas como la deforestación, transporte, expansión de la agricultura, procesos industriales, aumento de las aguas residuales, entre otros; y el cambio climático global que ocasiona el aumento de la temperatura media global y cambios en el patrón de lluvias, representan un riesgo importante para la salud humana y otras formas de vida (Hoang et al., 2018; Silva, Lopes, & Santos, 2023; Travaglio et al., 2021; Tsatsakis et al., 2020).

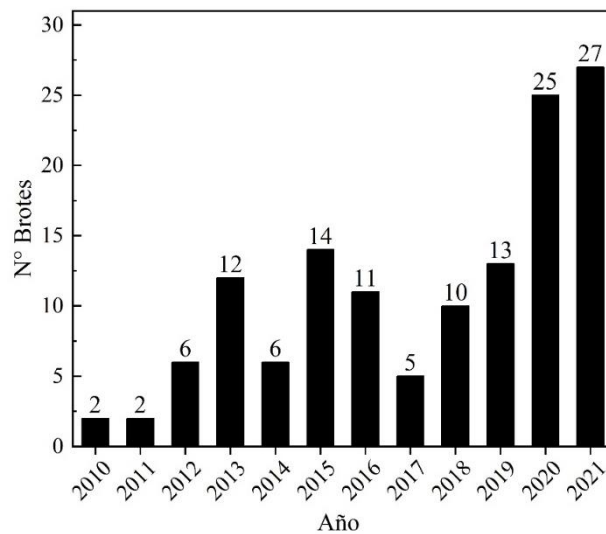
Asimismo, debido a la urbanización se viene invadiendo hábitats naturales de los animales, esta actividad amenaza la ecología y el movimiento de la población animal y crea una gran posibilidad de intercambio de enfermedades entre humanos y vida silvestre; adicionalmente, la deforestación y el desarrollo agrícola son cambios ecológicos que ocasionan la aparición de diferentes patógenos y nuevos virus (Perveen, Bin Muzaffar, & Ali Al-Deeb, 2021; The Lancet Infectious, 2023; Wu et al., 2017).

Un ejemplo de cómo un virus animal saltó los límites de las especies y pudo infectar a los humanos de forma tan productiva es el síndrome respiratorio agudo severo coronavirus 2 (SARS-CoV-2) que causa la enfermedad por coronavirus 2019 (COVID-19); es decir el SARS-CoV-2 surgió en la población humana procedente de un hospedador animal intermedio (Andersen et al., 2020; Meredith et al., 2020; Voskarides, 2022). Este nuevo coronavirus se extendió por todo el mundo, infectando a 655,689,115 personas y causando 6,671,624 muertes al 04 de enero del 2023 (WHO, 2023).

Según Sturdy y colaboradores (2020), existe un gran riesgo del incremento de la morbilidad y mortalidad de los pacientes enfermos de COVID-19 en estado crítico ocasionado por el descuido en el control de las infecciones adquiridas en el hospital, también conocidas como Infecciones Asociadas a la Atención de Salud (IAAS) (Sturdy et al., 2020). Estas infecciones son consideradas como indicadores de la atención de calidad al paciente, pues son efectos adversos prevenibles (Riu et al., 2016; Zingg et al., 2015), aparte de ello, son problemas que implican mayores costos de hospitalización, periodos de tratamiento prolongados, compromete la condición de salud de los pacientes y puede ocasionar el aumento en la tasa de mortalidad (Duszynska et al., 2020; Grae et al., 2023).

En el Perú, en setiembre del 2020, el Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades del MINSA emitió una alerta epidemiológica sobre el riesgo del incremento de IAAS en el contexto de la epidemia generada por el COVID-19, puesto que, en el periodo de marzo a junio del 2020 disminuyó la notificación de la vigilancia de IAAS hasta en 60% (Centro Nacional de Epidemiología Prevención y Control de Enfermedades - MINSA, 2020). Aparte de ello, nuestra respuesta hospitalaria frente a la emergencia sanitaria del COVID-19 evidencia deficiencias para el cumplimiento de las medidas de prevención de IAAS como son: la permanente vigilancia epidemiológica, higiene de manos según los pasos y momentos establecidos por la Organización Mundial de la Salud, evaluación permanente del uso de dispositivos invasivos, limpieza y desinfección de ambientes hospitalarios, esterilización apropiada de equipos y dispositivos médicos, uso racional de antimicrobianos y otras medidas (Centro Nacional de Epidemiología Prevención y Control de Enfermedades - MINSA, 2020; Quispe, 2020).

En el transcurso de los últimos cinco años, en nuestro país el número de brotes de IAAS ha ido incrementándose, se notificaron 25 brotes en el 2020 y en el 2021 se reportó 27 brotes hasta el mes de octubre (Garro, 2021). Los patógenos causantes del 69% de los brotes de IAAS registradas en los últimos 3 años son las bacterias, ocupando el primer lugar la bacteria *Acinetobacter baumannii*, seguido de *Klebsiella pneumoniae* y posteriormente de *Pseudomona aeuriginosa* (Garro, 2021). En la Figura 1 se muestra el número de brotes de las IAAS registrados durante el periodo comprendido del 2010 al 2021.



Fuente: Adaptado de Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades, Garro, 2021

Figura 1. Número de brotes de IAAS entre los años de 2010 al 2021.

Dentro de los elementos necesarios para la transmisión de IAAS en los centros de salud se tienen a la fuente de microorganismos infecciosos, el huésped susceptible y el medio de transmisión del microorganismo al huésped (Birgand et al., 2023; Collins, 2008). En este último elemento, los microorganismos se pueden propagar a través de mecanismos de transmisión comunes como gotitas respiratorias (fluidos corporales), propagación en el aire de los microorganismos, vehículos comunes (alimentos, agua, medicamentos, soluciones, dispositivos o equipos contaminados) y por contacto directo o indirecto (Collins, 2008; Gonzalez-Martin, 2017). En la transmisión por contacto directo, los microorganismos pasan de la fuente infecciosa al huésped susceptible, sin mediar otros elementos en la transmisión (Organización Panamericana de la Salud, 2017). Para el caso de contacto indirecto, la transmisión del microorganismo al huésped susceptible se produce a través de un medio transitorio, este medio puede ser las manos del personal de salud a otro paciente y objetos inertes de la habitación como materiales textiles (Birgand et al., 2023; Collins, 2008; Sze-To et al., 2014), principalmente textiles que están en contacto directo con el cuerpo humano como la ropa de cama, toallas, uniformes del personal de salud, pijamas y otros (Ballottin et al., 2017; Perelshtein et al., 2015).

Una de las medidas destinadas a reducir y prevenir la incidencia de IAAS son las precauciones basadas en el mecanismo de transmisión de los microorganismos, estas se utilizan cuando hay información del diagnóstico del paciente o cuando se tiene la sospecha de infección por microorganismo (Organización Panamericana de la Salud, 2017).

Otra medida son las precauciones estándares que se aplican a todos los pacientes independientemente del diagnóstico o sin conocimiento de presencia de infección. Estas precauciones pueden comprender: a) la higiene de manos cuyo objetivo es eliminar la suciedad, materia orgánica y flora microscópica transitoria. La higiene puede ser mediante el lavado con agua y jabón o detergente, con y sin antiséptico o por medio de la frotación de las manos con soluciones de alcohol (Organización Panamericana de la Salud, 2017); b) el uso de equipo de protección personal (EPP) para evitar la transmisión de agentes infecciosos. Los EPPs empleados con mayor frecuencia son los guantes, batas, protector facial, respiradores, mascarillas y delantal (Organización Panamericana de la Salud, 2017); y c) el manejo del ambiente, que es referido al instrumental, superficies, equipos, desechos y ropa; el protocolo de limpieza y desinfección realizados en el ambiente deben acomodarse al riesgo asociado a los equipos, superficies, ropas y especialmente a las características de los microorganismos en vista de que no todos responden de la misma manera frente a la limpieza

y desinfección (Organización Panamericana de la Salud, 2017). Adicional a estas precauciones se tienen a los materiales con propiedades antimicrobianas como los tejidos funcionalizados con nanopartículas de óxidos semiconductores (de Oliveira et al., 2023).

1.2. Antecedentes

La modificación química y morfológica de sustratos textiles a través de procesos nanotecnológicos está permitiendo un gran avance en la producción de textiles multifuncionales de alto rendimiento con valor agregado (Rashid, Simončič, & Tomšič, 2021). La aplicación de nanopartículas para acabados especiales es un área emergente en la ingeniería textil y ha abierto un gran potencial para el desarrollo de nuevos productos que pueden ser utilizados en el área médica, civil, automotriz, deportes, defensa, energía, electrónica, entre otros (Bishnoi et al., 2021; Mangala & Bapan, 2019); esto principalmente sin modificar su estética y confort. Algunos ejemplos de propiedades funcionales son: la repelencia al agua y aceite, repelencia a las manchas, autolimpieza, resistencia a las arrugas, resistencia al fuego, propiedad antiestática, protección UV, mejora de la capacidad de teñido, antimicrobiano, entre otros (Ahmad et al., 2023; Rashid, Simončič, & Tomšič, 2021; X. Wang et al., 2021; Ye et al., 2020).

Los textiles antimicrobianos son importantes para la prevención de infecciones hospitalarias o IAAS (Bonaldi, 2018). Hay una gran demanda de este tipo de textiles debido a las preocupaciones por la higiene y el bienestar, en vista de que los microorganismos crecen en los textiles durante su almacenamiento y uso, ello provoca decoloración de la tela, olores desagradables, reducción de la resistencia de la tela y entre otros deterioros (Bonaldi, 2018). Los textiles tratados con acabados antimicrobianos protegen al usuario y al textil del daño causado por los microorganismos (Bonaldi, 2018). Los acabados antimicrobianos pueden ser producidos a partir de compuestos orgánicos como aminas, alcoholes, amonio cuaternario, fenoles y aldehídos (Z. Li et al., 2020), compuestos naturales (Oluwaseun, Adefusika, & Abel, 2021; Saha & Mondal, 2021), compuestos minerales y otros. Dentro de los compuestos minerales tenemos a los fotocatalizadores, iones metálicos y óxidos (Bengalli et al., 2021; Bonaldi, 2018; D. Wang et al., 2022).

El uso de los metales platino, oro y plata predominan sobre otros materiales metálicos debido a su amplio espectro antimicrobiano, de igual manera, se utilizan los óxidos metálicos como el dióxido de titanio (TiO_2), óxido de magnesio (MgO), dióxido de silicio (SiO_2), óxido

de zinc (ZnO) y óxido de cobre (CuO) por su estabilidad térmica, naturaleza no tóxica, biocompatibilidad y rentabilidad (Bhandari et al., 2022). Las nanopartículas de metales y óxidos de metal se están empleando para impartir propiedades antimicrobianas a los textiles debido a su gran área superficial, algunas de estas nanopartículas son la plata (Ag), ZnO, cobre (Cu), CuO, TiO₂, entre otros (Bhandari et al., 2022).

Las nanopartículas de plata son las más explotadas por sus propiedades antimicrobianas en textiles, su actividad antimicrobiana es atribuida a compuestos de Ag y a los iones plata (Ag⁺), la toxicidad de estos iones se limita a las bacterias y otros microbios, por ello, se puede aplicar en materiales textiles destinadas al tratamiento de heridas y en materiales de envasado de alimentos (Bhandari et al., 2022). Nam *et al.* (2021) (Sunghyun Nam et al., 2021), reportaron que el uso de una fibra de algodón de color marrón como agente reductor y estabilizador permitió autosintetizar nanopartículas de Ag, esto producido por los componentes naturales de la fibra de color marrón que son los taninos, los cuales redujeron los iones Ag y la estructura de fibra hinchada para estabilizar el crecimiento de las partículas. La síntesis *in situ* de nanopartículas de Ag se llevó a cabo sumergiendo una fibra de algodón marrón en una solución acuosa de nitrato de plata, la solución fue calentada a 80°C o 100°C por 15 a 120 min, luego la fibra se lavó con la finalidad de eliminar los iones de Ag que no reaccionaron. Las micrografías electrónicas de transmisión de la sección transversal de la fibra de algodón mostraron una gran cantidad de nanopartículas dispersas en todo el volumen de la fibra. Asimismo, la fibra de algodón autosintetizada con nanopartículas de Ag inhibió el crecimiento del 99,99% de las bacterias *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas aeruginosa* antes y después de ser sometida a 50 ciclos de lavado.

Las nanopartículas de ZnO también son aplicados en textiles para producir materiales con protección a la radiación UV, repelentes al agua, resistentes al fuego y materiales con actividad antimicrobiana (Bhandari et al., 2022). En el trabajo de Munir *et al.* (2022), sintetizaron nanopartículas de ZnO por el método hidrotermal a partir de la disolución en 200 mL de metanol de acetato de zinc dihidratado e hidróxido de sodio, parte de las nanopartículas sintetizadas fueron modificadas con una mezcla en proporciones molares iguales de cloruro de 3-trimetoxisililpropilo y N,N-dimetil-N-octadecilamina. Las nanopartículas de ZnO sintetizadas con y sin modificación fueron aplicadas sobre un tejido 100% algodón por medio de la técnica de recubrimiento por inmersión. El tejido con nanopartículas de ZnO modificado tuvo mejor actividad antimicrobiana frente a la cepa

Staphylococcus aureus en comparación con el tejido sólo nanopartículas de ZnO (Munir et al., 2022).

Otras nanopartículas de óxidos metálicos que poseen propiedades antimicrobianas son los óxidos de cobre, los cuales se pueden aplicar en materiales textiles por diferentes metodologías como irradiación con ultrasonido, recubrimiento por inmersión, recubrimiento por inmersión-secado-curado, simple inmersión, teñido por agotamiento, entre otros (L. E. Román et al., 2020; A. K. Singh, 2023).

Parte del presente estudio está enfocado en la funcionalización de tejidos con óxidos de cobre, los antecedentes nacionales e internacionales respecto a este tema serán descritas en las secciones 1.2.1 y 1.2.2.

1.2.1. Antecedentes nacionales

En la investigación realizada por León *et al.* (2009), impregnaron gasa de algodón con nanopartículas de óxido de cobre (CuO) mediante ultrasonido. A una solución de sulfato de cobre se adicionó gasa de algodón, el sistema fue irradiado con ultrasonido y luego fue añadido amoníaco, para de nuevo irradiar con ultrasonido por 1 h. La gasa impregnada con las nanopartículas fue lavada varias veces para eliminar restos de amoníaco. Por microscopía de luz observaron que las partículas de CuO de color marrón se aglomeraron sobre y entre las fibras de los hilos componentes de la gasa. La evaluación de la actividad antimicrobiana de las gasas fue determinada con el método de difusión en agar de Kirby Bauer. Las gasas impregnadas con nanopartículas de CuO formaron un halo de inhibición de 14 mm frente a la bacteria *Staphylococcus aureus* y un halo más reducido frente a la bacteria *Escherichia coli*, no obstante, frente a la *Pseudomonas aeruginosa* no hubo halo (Leon et al., 2009).

Condori y Vivas (2016), sintetizaron nanopartículas de CuO por el método de precipitación química, para ello, emplearon soluciones acuosas de 0,02 M de acetato de cobre monohidratado y sulfato de cobre pentahidratado y 0,1 M de hidróxido de sodio. Las nanopartículas que obtuvieron a partir de sulfato de cobre pentahidratado fueron lavadas y suspendidas en agua destilada. Esta suspensión fue empleada para funcionalizar un tejido de algodón por medio del método de teñido textil de impregnación. El tejido funcionalizado presentó buena hidrofiliadad, pero una distribución irregular de las nanopartículas de CuO en su superficie. La evaluación microbiológica frente a la bacteria *Escherichia coli* (ATCC 25922) mostró resultados de porcentaje de reducción bacteriana de 81,6% y 70,6% del tejido

funcionalizado antes y después de 5 ciclos de lavados domésticos, respectivamente (Condori & Vivas, 2016).

Amézquita (2016), sintetizó *in situ* nanopartículas de CuO sobre tejidos de 100% algodón empleando el método de teñido textil de agotamiento. Para la funcionalización utilizó una concentración constante de hidróxido de sodio y diferentes porcentajes de acetato de cobre monohidratado, los porcentajes fueron respecto al peso del tejido. Los resultados de la evaluación microbiológica mostraron que los tejidos funcionalizados con nanopartículas de CuO redujeron el crecimiento bacteriano de la cepa *Escherichia coli* (ATCC 25922) entre 92,2 y 99,8%. Además, en las micrografías electrónicas de los tejidos funcionalizados se observó que las nanopartículas de CuO estaban aglomeradas en la superficie de la fibra de algodón, al mismo tiempo por difracción de rayos X confirmó que la estructura cristalina de las partículas presentes en los tejidos funcionalizados correspondía al CuO (Amézquita, 2016).

De manera similar, Villalva (2021), funcionalizó *in situ* tejidos 100% algodón con nanopartículas de CuO por medio de los métodos de teñido textil de agotamiento, impregnación y agotamiento-impregnación. Para las síntesis del CuO utilizó sulfato de cobre pentahidratado e hidróxido de sodio. En la evaluación de la solidez al sudor de los tejidos funcionalizados con CuO por los tres métodos, reportó que la puntuación mínima en transferencia de color hacia otras fibras fue de valor 4, que indica que apenas hubo manchado. Para el cambio de color, los valores de los tejidos obtenidos por agotamiento, impregnación y agotamiento-impregnación fueron de 2-3, 3-4 y 4, respectivamente. Además de ello, en esta investigación se reportó que los tejidos funcionalizados con CuO por los tres métodos, inhibieron el crecimiento de la bacteriana *Escherichia coli* en 99,9%. Después de lavar los tejidos funcionalizados 25 veces, el porcentaje de reducción antibacteriano disminuyó a 26, 84, 27% para los métodos de agotamiento, impregnación y agotamiento-impregnación, en su orden respectivo. En los espectros de fotoelectrones de rayos X del tejido funcionalizado con CuO por el método de impregnación, se detectó picos de C1s y O1s relacionados con la celulosa, de igual forma, fue detectado el pico de Cu 2p_{3/2}, el cual evidenció la presencia de CuO en el tejido de algodón (Villalva, 2021).

1.2.2. Antecedentes internacionales

En los antecedentes internacionales tenemos la investigación realizada por el grupo de El-Nahhal (2018). Ellos obtuvieron fibras de algodón funcionalizadas *in situ* con

nanopartículas de CuO. Su proceso consistió en irradiar con ultrasonido una mezcla compuesta de sulfato de cobre pentahidratado disuelto en diferentes surfactantes, hidróxido de sodio y muestras de algodón. Se puede destacar de este artículo el análisis realizado por espectroscopía fotoelectrónica de rayos X, cuyos resultados mostraron que el algodón funcionalizado exhibió picos de cobre (Cu 2p), carbono (C1s) y oxígeno (O1s) lo que sugirió que las partículas presentes en las muestras fueron de CuO, y esta información fue corroborada por difracción de rayos X, visto que, los difractogramas del algodón con y sin tensoactivos correspondieron a la fase del CuO monoclinico. Por último, las pruebas de actividad antimicrobiana informaron que todas las muestras de algodón con nanopartículas de CuO con y sin surfactantes tuvieron porcentajes de reducción mayor de 85% frente a bacterias y hongos, sin embargo, esta actividad se fue reduciendo con el incremento de los ciclos de lavado (El-Nahhal et al., 2018).

Markovic *et al.* (2019), funcionalizaron *in situ* textiles con óxidos de cobre empleando el método de recubrimiento por inmersión. Para ello, previamente lavaron tejidos de algodón con una solución de detergente no iónico y luego los sumergieron en soluciones de ácido oxálico de diferentes concentraciones para modificar su superficie y crear grupos carboxilo que mejorasen el anclaje de los iones Cu^{+2} . Esta investigación indicó que los textiles de algodón con una mayor cantidad de ácido oxálico absorbieron más iones de cobre, lo que se pudo visualizar en micrografías electrónicas y se correlacionó con excelentes resultados microbiológicos contra bacterias Gram-positivas y Gram-negativas. Por el contrario, no se reportó la captación de iones Cu^{+2} de algodón sin tratamiento previo, y esta información hubiera sido útil para verificar y comparar la influencia del ácido oxálico en la captación de iones antes y después de su aplicación. Un aspecto importante de este estudio es que determinó el estado de oxidación del cobre presente en muestras textiles, y también reportó que el algodón tratado con mayor cantidad de ácido oxálico presentó una mezcla de óxido cuproso (Cu_2O) y óxido cúprico (CuO), siendo el CuO el más abundante (Marković et al., 2019).

De manera similar, el autor Zarbaf y colaboradores (2017) sintetizaron *in situ* nanopartículas de óxidos de cobre en prenda de jean 100% algodón por el método de recubrimiento por inmersión para otorgarle propiedades antibacterianas; utilizaron sulfato de cobre, hidróxido de sodio y un agente antiarrugas, además de glucosa como variable de análisis. Usando la técnica de difracción de rayos X demostraron la formación de Cu_2O y CuO en las muestras con y sin glucosa, respectivamente; y por espectroscopía UV-Visible

del efluente de una muestra con glucosa evidenciaron la presencia de un pico que representó al Cu_2O . Asimismo, las muestras inhibieron el crecimiento de bacterias Gram-positivas y Gram-negativas, incluso después de 30 ciclos de lavados. Adicionalmente, los autores propusieron ecuaciones de las posibles interacciones químicas entre los reactivos empleados y la celulosa del algodón. Una de ellas fue que la celulosa del algodón en contacto con el hidróxido de cobre ($\text{Cu}(\text{OH})_2$), formado por la reacción química entre el sulfato de cobre y el hidróxido de sodio, produjo nanopartículas de CuO en el denim, esto sin la presencia de glucosa, sin embargo, con la glucosa en la reacción, las nanopartículas sintetizadas en la tela fueron de Cu_2O (ZarbaF, Montazer, & Sadeghian Maryan, 2017).

Aparte de la literatura mencionada anteriormente, existen otros que fueron revisados y estudiados en un previo estudio (L. E. Román et al., 2020), donde se proporciona mayor información sobre los métodos *in situ* y *ex situ* de funcionalización de materiales textiles con nanopartículas de CuO .

1.3. Identificación y descripción del problema de estudio

A partir de la literatura mencionada en la sección 1.2, podemos apreciar que los materiales textiles funcionalizados con nanopartículas de CuO presentaron propiedades antimicrobianas, por ello, inhibieron el crecimiento de bacterias Gram-positivas y Gram-negativas, asimismo, se pudo percibir que hay algunos autores que reportaron la resistencia de la propiedad antimicrobiana frente a ciclos de lavados domésticos, esta resistencia nos sugiere la posible existencia de algún tipo de interacción entre el material textil y el óxido de cobre, del mismo modo, se apreció que los autores ZarbaF *et al.*, plantearon ecuaciones químicas de la posible reacción entre la celulosa de algodón de un tejido de jean y los reactivos empleados para sintetizar óxidos de cobre, mas no reportaron la interacción entre ambos materiales. En contraste, hay pocas aportaciones acerca de la forma en la que posiblemente estén interactuando el algodón con los óxidos de cobre.

1.4. Formulación del problema

Según lo descrito en la sección 1.3 se formuló el problema general y los problemas específicos.

1.4.1. Problema general

¿Cuál es la interacción físico-química entre la celulosa de algodón y óxidos de cobre (CuO_x) de un tejido antimicrobiano obtenido por el método de teñido de agotamiento funcionalizado con estos mismos óxidos?

1.4.2. Problemas específicos

- ¿Es factible funcionalizar *in situ* tejidos de algodón con CuO_x por el método de teñido de agotamiento utilizando sales precursoras de acetato, nitrato y sulfato de cobre para obtener tejidos antimicrobianos?
- ¿Existe relación entre las características colorimétricas, tanto del tejido no-funcionalizado como de los tejidos obtenidos durante proceso de funcionalización con CuO_x , y la presencia de cobre en los tejidos?
- ¿En qué medida las caracterizaciones elementales, superficiales y morfológicas del tejido no-funcionalizado y los tejidos obtenidos en el proceso de funcionalización con CuO_x contribuyen con el estudio de la interacción físico-química entre los óxidos de cobre y la celulosa de la fibra de algodón?
- ¿Cuál es la resistencia de la propiedad antimicrobiana de los tejidos funcionalizados con CuO_x frente a las pruebas de lavado doméstico?

1.5. Justificación

El manejo de las enfermedades infecciosas causadas por microorganismos patógenos como bacterias, virus, parásitos y hongos, es de gran interés por el bien de la salud pública, y cada año existe una mayor demanda de estudios debido a su creciente impacto a nivel mundial y a que los agentes infecciosos siguen surgiendo y resurgiendo con nuevas resistencias (Grae et al., 2023; Scott et al., 2020; Van Baarle et al., 2020; Zorrilla-Vaca & Escandón-Vargas, 2017). Los productos textiles retienen la humedad y tienen una gran superficie, por ello, son un medio excelente para el crecimiento microbiano, y por estar en contacto directo con la piel humana, pueden servir como vehículos potenciales para la transmisión de enfermedades infecciosas (Sunghyun Nam et al., 2021). Por tal motivo, la aplicación de acabados con propiedades antimicrobianas sobre los textiles es una buena

alternativa para evitar el crecimiento y propagación de microorganismos, especialmente en entornos donde se congregan personas o pacientes, como son en los centros hospitalarios. En el año 2019, el mercado general de textiles antimicrobianos se valoró en 10.480,0 millones de dólares y es probable que supere los 20,500.0 millones de dólares en el 2026 (Sunghyun Nam et al., 2021). Para el desarrollo de textiles antimicrobianos se vienen investigando diferentes metodologías de funcionalización con nanopartículas de metales y óxidos semiconductores (Bhandari et al., 2022; A. K. Singh, 2023).

En el presente trabajo de investigación se funcionalizó tejidos de algodón con óxidos de cobre por el método de teñido textil de agotamiento. La diferencia de esta investigación con respecto a otras, radicó en el estudio a profundidad de la interacción física o química existente entre los óxidos de cobre y la celulosa del algodón del tejido funcionalizado. Con este conocimiento se podría llegar a mejorar y controlar el proceso de funcionalización, puesto que, con el avance de la tecnología, es posible fabricar nanopartículas del tamaño y forma deseados con diversas propiedades funcionales (Bhandari et al., 2022).

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Estudiar la interacción físico-química entre la celulosa de algodón y óxidos de cobre (CuO_x) de un tejido antimicrobiano obtenido por el método de teñido de agotamiento funcionalizado con estos mismos óxidos.

1.6.2. Objetivos específicos

- Funcionalizar *in situ* tejidos de algodón con CuO_x por el método de teñido de agotamiento utilizando sales precursoras de acetato, nitrato y sulfato de cobre para obtener tejidos antimicrobianos.
- Determinar la relación que existe entre las características colorimétricas, tanto del tejido no-funcionalizado como de los tejidos obtenidos durante proceso de funcionalización con CuO_x , y la presencia de cobre en los tejidos.
- Determinar la contribución de las caracterizaciones elementales, superficiales y morfológicas del tejido no-funcionalizado y los tejidos obtenidos en el proceso de

funcionalización con CuO_x con el estudio de la interacción físico-química entre los óxidos de cobre y la celulosa de la fibra de algodón.

- Determinar la resistencia de la propiedad antimicrobiana de los tejidos funcionalizados con CuO_x frente a las pruebas de lavado doméstico.

1.7. Hipótesis y variables

1.7.1. Hipótesis general

Existe un tipo de interacción entre la celulosa de algodón y óxidos de cobre (CuO_x) de un tejido antimicrobiano obtenido por el método de teñido textil de agotamiento funcionalizado con estos mismos óxidos que permite que la propiedad antimicrobiana persista luego de ciclos de lavados.

1.7.2. Hipótesis específicas

- Si es factible funcionalizar *in situ* tejidos de algodón con CuO_x por el método de teñido de agotamiento utilizando sales precursoras de acetato, nitrato y sulfato de cobre para obtener tejidos antimicrobianos.
- Existe relación directa entre las características colorimétricas, tanto del tejido no funcionalizado como de los tejidos obtenidos durante proceso de funcionalización con CuO_x , con la presencia de cobre en los tejidos.
- Las caracterizaciones elementales, superficiales y morfológicas del tejido no funcionalizado y los tejidos obtenidos en el proceso de funcionalización con CuO_x facilitan el estudio de la interacción físico-química entre los óxidos de cobre y la celulosa de la fibra de algodón.
- La propiedad antimicrobiana de los tejidos funcionalizados con CuO_x tiene buena resistencia frente a las pruebas de lavado doméstico.

1.7.3. Variables

Variable independiente: Interacción físico-química entre la celulosa del algodón y óxidos de cobre (CuO_x).

Variable dependiente: Propiedad antimicrobiana de los tejidos funcionalizados con CuO_x.

1.8. Metodología

1.8.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación del presente trabajo es básica, dado que, tiene como finalidad estudiar la interacción entre la celulosa de algodón y óxidos de cobre de un tejido antimicrobiano funcionalizado con estos mismos óxidos.

Asimismo, la investigación es descriptiva, explicativa. En el cual, se busca especificar las características colorimétricas, elementales, superficiales y morfológicas del tejido no-funcionalizado y los tejidos obtenidos en el proceso de funcionalización con CuO_x. De igual modo, la investigación se enfoca en explicar por qué ocurre la resistencia de la propiedad antimicrobiana de los tejidos funcionalizados con CuO_x frente a ciclos de lavados domésticos; así como también explicar qué tipo de interacción existe entre la celulosa del algodón y óxidos de cobre.

Adicionalmente, la investigación es experimental, con participación del investigador en: la obtención de tejidos funcionalizados con CuO_x, donde se hizo uso de equipos de laboratorio existentes en las industrias textiles de procesos húmedos; en los análisis colorimétricos empleando un espectrofotómetro de reflectancia; en la obtención de datos para realizar el estudio de la interacción entre la celulosa de algodón y óxidos de cobre por medio de técnicas de superficies; en la evaluación microbiológica siguiendo el protocolo de la norma ASTM E2149:2013 frente a las bacterias *Escherichia coli* (ATCC 25922) y *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 10145); en las pruebas de lavados según la norma técnica internacional ISO 105-C06:2010; y en los controles de calidad evaluados con normas técnicas. La descripción en detalle de los procedimientos empleados será descrita en el capítulo III.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Bases teóricas

Esta sección comprende de una revisión de la literatura en temas de tejidos técnicos y sus áreas de aplicación, acabados textiles, fibras textiles y características generales de la fibra de algodón, óxidos empleados en acabados textiles, óxidos de cobre, técnicas de caracterización de materiales y colorimetría.

2.1.1. Textiles técnicos o textiles funcionales

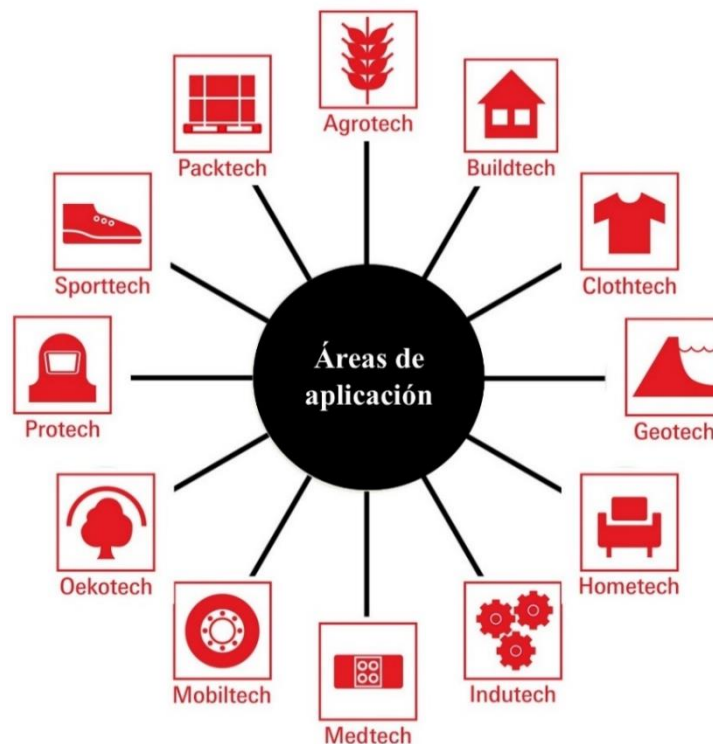
Los textiles son divididos en tres grupos principales: textiles para ropas, textiles para el hogar y textiles técnicos. Los grupos de textiles para ropas y para el hogar como cortinas, tapetes, textiles de paredes y otros, parecen ser fácilmente definidos, por lo que, se concluiría que el grupo restante pertenece a los textiles técnicos, pero esta simple definición no es muy aceptable, pues los trajes de presión para los astronautas o las prendas resistentes al agua y frío de los buceadores no pertenecen al grupo de las ropas sino al grupo de los textiles técnicos (Gries et al., 2015). En consecuencia, los textiles técnicos se definen como materiales y productos textiles fabricados por sus propiedades técnicas y alto rendimiento en lugar de sus características estéticas o decorativas (Aldalbahi et al., 2021; Gries et al., 2015; Horrocks & Anand, 2016b). El uso de un término específico que describa este tipo de productos no se limita a los vocablos “técnico” o “industrial” sino también se emplean términos como textiles de alto rendimiento, textiles funcionales, textiles de ingeniería y textiles de alta tecnología (Aldalbahi et al., 2021; Horrocks & Anand, 2016b).

En comparación con los textiles tradicionales, los textiles técnicos tienen calidad de ejecución extremadamente precisa por ello son más costosos, requieren programas de producción más flexibles y períodos de fabricación más pequeños y el fabricante debe estar dispuesto a invertir en investigación y desarrollo (Aldalbahi et al., 2021). Los textiles técnicos también ofrecen materiales alternativos, nuevas tecnologías, componentes funcionales y sustitución de materiales, por ejemplo, el reemplazo de materiales tradicionales como el acero y el cemento por otros más sostenibles con el medio ambiente (Horrocks & Anand, 2016b). En el año 2019, se estimó que el tamaño del mercado global

de textiles técnicos representó un volumen de negocios de 176,6 mil millones de dólares americanos y se prevé una tasa de crecimiento anual compuesta del 4,5% del 2020 a 2027 debido a la creciente conciencia sobre los beneficios de estos materiales que pueden ser incluidos en la agricultura, construcción, industria aeroespacial, medicina y embalaje (Grand View Research, 2020). Finalmente, en los próximos años el desarrollo de textiles de alto rendimiento será una competencia mundial que buscará más aplicaciones con productos de alta calidad, menor costo y respetuosos con el medio ambiente (Aldalbahi et al., 2021).

2.1.1.1. Áreas de aplicación de los textiles técnicos

La principal exposición comercial internacional de textiles técnicos (*Techtextil*) definió doce áreas de aplicación principales, ello dependiendo del usuario final, de las propiedades funcionales y de las características del producto (Gries et al., 2015; Horrocks & Anand, 2016b). La Figura 2 muestra las diferentes áreas de aplicación de los textiles técnicos.



Fuente: Adaptado de Techtextile, 2020

Figura 2. Áreas de aplicación de los textiles técnicos.

1) Agricultura, acuicultura, horticultura y silvicultura (*Agrotech*)

Los textiles en esta área se distinguen por su elongación, rigidez, biodegradación, resistencia y protección contra la luz y medio ambiente tóxico, algunos ejemplos de textiles usados en la agricultura son los de separación de capas en los campos, los empaques de protección contra el viento para almacenar césped, redes anti-pájaros y, demás (Aldalbahi et al., 2021).

Debido al aumento de la temperatura de la superficie global estamos experimentando variaciones climáticas extremas como disminución del número de noches frías y aumento del número de noches cálidas por año, estos cambios están generando fenómenos climáticos y meteorológicos como El Niño y granizadas que ocasionan pérdidas económicas importantes en el sector agrícola (Howden et al., 2007; Mditshwa, Magwaza, & Tesfay, 2019). En el caso de algunas industrias de producción de frutos subtropicales están utilizando mallas de sombra que mitigan daños potenciales resultantes de eventos climáticos como el granizo o tormentas de corto tiempo con efecto devastador que causan cicatrices, grietas o caídas de los frutos (Mditshwa, Magwaza, & Tesfay, 2019). Estas mallas pueden ser fabricadas de polietileno o polipropileno y tienen diferentes propiedades radiométricas, físicas y mecánicas (Mditshwa, Magwaza, & Tesfay, 2019), adicionalmente, protegen a las plantas del sol y reducen la evaporación del agua (Techtextile, 2020).

A parte de ello, cada vez más se utilizan contenedores flexibles de polipropileno para el almacenamiento y transporte de fertilizantes y cultivos agrícolas, asimismo, dentro de *Agrotech* también se tienen a las redes fabricadas con fibras de celulosa para aplicaciones en la industria pesquera; al césped sintético empleados en campos deportivos y superficies paisajísticas que son duraderos, resistentes y agradables con la piel; y a los no tejidos empleados en horticultura (Aldalbahi et al., 2021).

2) Edificación y construcciones (*Buildtech*)

Los textiles *Buildtech* se emplean en la construcción, en refuerzo de hormigón, arquitecturas de interiores, alcantarillado, aislamiento térmico y acústico, aire acondicionado, revestimiento de viviendas, refuerzo de paredes, productos estéticos, entre otros; y en virtud de sus características ligeras, fuertes, ignífugas, resistentes a putrefacción, luz solar e intemperie pueden ser aplicados para fines temporales como toldos, marquesinas

y carpas (Aldalbahi et al., 2021; Gries et al., 2015). Ejemplos de la utilización de estos textiles se aprecian en estadios, teatros, aeropuertos, presas, puentes, túneles, carreteras, etc., esto fuera de su amplio uso en los procesos de construcción como redes de seguridad y cables de elevación y tensión (Aldalbahi et al., 2021).

El hormigón con refuerzo textil es un producto formado a partir de la combinación de matriz cementosa y normalmente un tejido textil 2D, la sustitución de armaduras de acero convencionales por estructuras de fibras textiles fabricadas a partir de materiales de alto rendimiento como aramida, vidrio, basalto y fibras de carbono permite realizar diferentes proyectos arquitectónicos que antes se consideraban imposibles, en otros términos, se puede adaptar a geometrías complejas de forma libre y producir componentes delgados con formas complicadas. Adicionalmente, el hormigón textil proporciona una alta resistencia en compresión y tensión y, sus propiedades de menor peso y mayor resistencia los hacen más ecológicos con respecto al aluminio y acero (Nguyen et al., 2020).

En el trabajo de investigación de Briga-Sá *et al.* (2013), usaron residuos de tejidos textiles y residuos de estos mismos denominado sub-residuo de tejido para estudiarlos como materiales de construcción de aislamiento térmico. Mencionan que los residuos textiles son reutilizables y pueden incluirse en la construcción de edificios debido a sus diferentes posibilidades de aplicación y las fuentes de residuos de tejidos pueden ser la propia industria textil o simplemente las ropas en desuso. Asimismo, explican que a causa de la función principal de la ropa de proteger el cuerpo humano del frío o calor para mantener condiciones de confort térmico y esto se consigue con una adecuada transferencia de calor entre el cuerpo humano y el ambiente exterior, se han llevado a cabo estudios con la finalidad de analizar los fenómenos de transferencia de calor a través de los tejidos textiles, estos estudios mostraron que las propiedades de aislamiento térmico de los tejidos están relacionadas con la estructura capilar y características superficiales de los hilos y con la distribución del volumen de aire en ellos. Para determinar la conductividad térmica de los residuos textiles, construyeron un modelo de muro compuesto por seis capas, estas son: 1) mortero de cemento (mezcla de arena, agua y cemento) de 1 cm de espesor; 2) muro de mampostería de ladrillo a base de cemento de 20 cm; 3) mortero de cemento de 1 cm; 4) caja de aire de 6 cm; 5) muro de mampostería de ladrillo cerámico de 11 cm y; 6) mortero de cemento de 2,5 cm. Posteriormente, llenaron la caja de aire con los residuos de tejidos y los sub-residuos de tejidos completamente secos y por separado, luego monitorearon el desempeño térmico de modelo de muro con los dos diferentes residuos colocando caudalímetros de calor y sensores

de temperatura en la superficie del muro. Los resultados reportados mostraron que ambos residuos tuvieron capacidad de aislamiento térmico, pero el sistema compuesto por el muro con residuos de tejidos presentó una capacidad de 63% mayor que el sistema de muro con sub-residuos (Briga-Sá et al., 2013).

3) Componentes técnicos de calzado y vestuario (*Clothtech*)

Los textiles dentro de este grupo son utilizados en la fabricación de calzados y vestuario; comprenden fibras, hilos y textiles que se usan como hilos de coser, entretelas y aislantes. La inclusión de materiales de cambio de fase de temperatura en productos aislantes para crear un control y carácter resistente frente a repentinos cambios extremos de temperatura fría o caliente son uno de los avances actuales y altamente complicados desarrollados en esta área (Aldabahi et al., 2021). Algunos ejemplos son las casacas de exterior con calefacción que tienen suministro de electricidad a través de una batería; chalecos flexibles, hidrófugos, hidrófobos, resistentes al desgarramiento y con bolsa de aire para ciclistas; zapatillas deportivas tejidas en 3D; textiles confeccionados con materiales reciclables; zapatos hechos con imitación de cuero a base de granulados de corcho reciclado; ropa de calle futurista de uretano termoplástico, y entre otros (Techtextile, 2020).

Durante la última década hubo cambios significativos del sector textil convencional con aplicaciones más diversas que sustentan a muchas industrias; en algunas economías desarrolladas como las del Reino Unido y Estados Unidos hay evidencias de una reforma textil hacia aplicaciones de alta tecnología en área de prendas de vestir de tejido punto avanzado, especialmente en ropa deportiva (Power, 2018). La diversificación más reciente se encuentra en el mercado del calzado donde existe una variedad de aplicaciones avanzadas, incluidas las zapatillas para correr y botas de fútbol que están disponibles comercialmente (Power, 2018). Antes de los juegos olímpicos del 2012 celebrado en la ciudad de Londres, Reino Unido, la marca Nike presentó su revolucionario zapato “Flyknit”, cuyas partes superiores se produjeron con la tecnología sin costuras de tejido punto por trama, emplearon una combinación de hilos elásticos y no elásticos y variaciones de estructura diseñadas para proporcionar la parte superior del calzado sin costuras, ultraligera y ajustada. En el mismo año 2012, la marca de zapatos Adidas lanzó su producto “Adizero” que también tenía una parte superior producida con tecnología de tejido sin costuras. Mas tarde, este

enfrentamiento comercial entre los dos gigantes de ropas y accesorios deportivos condujo al desarrollo de botas de fútbol tejidas (Power, 2018).

4) Ingeniería civil y geotextiles (*Geotech*)

En el área de ingeniería civil, los textiles *Geotech* cada vez tienen mayores aplicaciones como estabilizadores, filtros y otros refuerzos, con ello se está generando el aumento de la demanda de textiles industriales (Aldalbahi et al., 2021). En los últimos 20 años del siglo XX, el uso de geotextiles se ha extendido geográficamente por todo el mundo y se prevé un mayor empleo de los mismo en países en desarrollo. Por otro lado, la palabra “geo” proviene del griego “tierra”, por lo que la definición de geotextiles es de materiales textiles permeables que se utilizan en combinación con el suelo u otro material de ingeniería civil (de Souza et al., 2020; Horrocks & Anand, 2016a).

Dentro de las funciones de los geotextiles tenemos: 1) Refuerzo, debido a la débil tensión del suelo es importante un elemento de refuerzo dentro de la masa del suelo o en combinación con el suelo para producir un compuesto que tenga propiedades de resistencia y deformación mejorada, de igual modo, el refuerzo permite construir tanto terraplenes sobre cimientos blandos como pendientes laterales de terraplén con ángulos más pronunciados de lo que sería posible con un suelo no reforzado (Horrocks & Anand, 2016a; Jeon, 2016). 2) Filtración, es una de las funciones más importantes de los geotextiles ya que actúan como filtros al permitir que líquidos y gases se muevan a través del suelo, pero retienen el paso de partículas de grano fino del suelo, este efecto de filtración se logra colocando el geotextil en estrecho contacto con el suelo de manera que se conserva la integridad física de la superficie del suelo por donde pasa el líquido (Horrocks & Anand, 2016a; Jeon, 2016). 3) Drenaje, el geotextil realiza el paso del fluido de un lugar a otro, de esta manera se efectúa su eliminación por evacuación; la transmisión de este fluido se realiza en la dirección del plano de la tela sin provocar pérdidas de partículas de suelo (Horrocks & Anand, 2016a; Jeon, 2016). 4) Separación, los geotextiles separan dos capas del suelo para evitar la mezcla de materiales de diferentes propiedades físicas, al mismo tiempo que soporta cargas estáticas y dinámicas del material de aporte y del tráfico durante su colocación (Jeon, 2016).

En la fabricación de geotextiles se pueden emplear fibras naturales y sintéticas. Las fibras naturales de origen vegetal a causa de sus propiedades de buena resistencia y módulo y menor alargamiento tienen gran potencial de aplicación en geotextiles, estas fibras son el

yute, sisal, lino, cáñamo, abacá y ramio, además de ello, tienen algunas ventajas como su bajo costo, robustez, durabilidad, disponibilidad y principalmente es amigable con el medio ambiente por su biodegradabilidad (de Souza et al., 2020; Horrocks & Anand, 2016a). Por otra parte, las fibras sintéticas se emplean también en la manufactura de los geotextiles, las comúnmente utilizadas son el polipropileno, poliéster, poliamida y polietileno (Horrocks & Anand, 2016a). El polipropileno es de bajo costo, tiene aceptables propiedades de tracción y densidad baja, entre sus desventajas están su sensibilidad a la radiación ultravioleta y su fácil deterioro en condiciones de alta temperatura; el poliéster o tereftalato de polietileno posee excelentes propiedades de tracción, pueden ser usados a temperaturas elevadas, pero es susceptible a degradación hidrolítica en suelos de pH mayor de 10; y las fibras de poliamida como el nylon 6,6 y nylon 6 son rara vez utilizadas en la fabricación de geotextiles, puesto que su costo y rendimiento general para este tipo de aplicación los hacen inferiores frente a otros polímeros (Horrocks & Anand, 2016a).

5) Textiles para el hogar y revestimiento de los suelos (*Homotech*)

Son textiles de alto rendimiento utilizados en muebles, revestimientos de pisos y paredes, decoración interna, alfombras, en protección solar y como retardantes de fuego en edificios, barcos, transporte y entre otros; la mayor aplicación de esta clase de textiles se encuentra en el área de muebles y prendas para el hogar (Aldalbahi et al., 2021). Como ejemplos se tienen a los forros estampados de los muebles producidos mediante impresión por sublimación térmica; alfombras y muebles hechos con hilos de polipropileno que son reciclables, robustos y aptos para el uso exterior; cojín de silla de cuero artificial; materiales con efecto climatizador resistentes a los rayos ultravioleta que son hechos con redes viejas de pesca; separadores de asientos y ambientes obtenidos mediante laminado sándwich, etc. (Tectextile, 2020)

A causa de los problemas de incendio que involucran a las espumas de los muebles y otros tipos de relleno, se están empleado cada vez más clases adicionales de fibra para reemplazarlos, entre ellas están las fibras huecas de aislamiento de alta calidad (Aldalbahi et al., 2021). En la patente US 2011/0274869 A1 se hace referencia a una fibra retardante de llama modificada a base de poliéster, esta fibra se caracteriza por ser hueca y estar provista de un acabado suave al tacto sin silicona. Este acabado comprende al menos un poliéter (polietilenglicol o propilenglicol) y un producto de condensación de ácidos grasos.

Adicionalmente, la fibra es una fibra cortada de poliéster constituida principalmente por derivados de ácidos dicarboxílicos aromáticos y dioles alifáticos que contienen de 2 a 4 átomos de carbono, también, la fibra está texturizada, rizada, con relación de peso por unidad de longitud (título) de 0,9 a 17 dtex y cortada a una longitud comprendida entre 1 a 150 mm. Fuera de ello, el retardante de llama está basado en compuestos halógenos o compuestos de fósforo que se incorporan por condensación a la cadena lineal o cadenas laterales del poliéster. Asimismo, la invención divulga el método de producción de la fibra y su uso como productos de relleno en ropa, cojines, muebles, material aislante, edredones, filtros, tapizados, bolsas de dormir, almohadas, fundas de colchones y colchones (K. Bernhard, Dahringer, & Klanert, 2011).

6) Filtración, transporte, limpieza y otros usos industriales (*Indutech*)

Este grupo de textiles contiene productos para la ingeniería mecánica y para las industrias química y eléctrica, son empleados como pantallas de plasma, transportes, sistemas de elevación y trituración, filtración, aislantes, recubrimiento de rodillos, otros (Aldalbahi et al., 2021). A parte de estas aplicaciones se vienen investigando otros artículos como los tejidos tipo punto con control integrado que poseen filamento conductor recubierto de plata que permite la comunicación hombre-máquina; sellos de seguridad que son invivibles a la luz solar, pero se reactivan con la luz ultravioleta; circuitos y sensores impresos; subestructura de alta resistencia y extremadamente ligero cosida con hilos de carbono para la fabricación de drones; absorbentes de polipropileno con estructura porosa; no tejidos fonoabsorbentes que desvían y no permiten el paso de ondas sonoras por las paredes; no tejido resistente a la temperatura para la recuperación de aceite usado en la prefiltración en metalurgia; y entre otros (Techtextile, 2020).

La filtración es un proceso mecánico o físico que separa una sustancia de otra con la ayuda de un medio de interposición denominado filtro (Horrocks & Anand, 2016a). La separación de sólidos de líquidos o gases es vital para la obtención de productos finales en diferentes procesos industriales, y los textiles técnicos se están utilizando típicamente como sistemas de filtración (Aldalbahi et al., 2021). Por la versatilidad, rendimiento constante, retención efectiva de partículas y tasas de flujo eficientes, los textiles de filtración tienen creciente demanda en el mercado mundial (Smtih, 2018). Entre las industrias que utilizan estos filtros están la de alimentos donde deben cumplir con ciertos criterios específicos

puesto que, entran en contacto directo con alimentos y bebidas, otras industrias son la nuclear, minería, construcción y farmacéutica (Smtih, 2018). Los textiles de filtración son generalmente hechos con fibras sintéticas que no promueven el flujo de electricidad a través de su estructura, esto puede generar la acumulación de carga eléctrica, por lo que deben diseñarse y fabricarse filtros con propiedades antiestáticas para particulares aplicaciones (Smtih, 2018).

7) Médica e higiene (*Medtech*)

Los textiles médicos de alto rendimiento son aquellos textiles empleados en aplicaciones médicas y de higiene, por otro lado, la industria textil médica es una combinación de tecnología textil y ciencias médicas con varios usos funcionales (Aldalbahi et al., 2021; Rohani Shirvan & Nouri, 2020). Existe una enorme y diversa aplicación de los textiles médicos dentro y fuera del cuerpo, una de estas aplicaciones puede ser una sutura con un solo hilo o empleando una compleja estructura compuesta para realizar reemplazo óseo, otras aplicaciones podrían comprender el uso de una simple toallita de limpieza hasta unas telas de barrera avanzadas utilizadas en los quirófanos (Horrocks & Anand, 2016a). Los textiles médicos se clasifican de la siguiente manera: a) para aplicaciones corporales externas (materiales no implantables); b) para aplicaciones corporales internas (materiales implantables); y c) para interfaz interna/externa (Horrocks & Anand, 2016a; Rohani Shirvan & Nouri, 2020).

Los materiales para aplicaciones externas como apósitos para heridas, vendas, tejidos médicos de compresión, productos protectores o de barrera, productos para el cuidado personal y entre otros, suelen estar en contacto con la piel, por lo cual, requieren tener un alto nivel de comodidad y conformidad del paciente (Rohani Shirvan & Nouri, 2020). Los apósitos para heridas son materiales compuestos que poseen una capa que absorbe sangre o líquidos; una capa de contacto con la herida que evita la adherencia del apósito a la misma y que debe retirarse con facilidad para no dañar el crecimiento del nuevo tejido de piel; además el apósito tiene un material de base flexible que normalmente son adhesivos de acrílicos (Horrocks & Anand, 2016a). Algunas de las funciones de los apósitos incluyen promover una curación rápida, absorber sangre y exudado sin secar la superficie de la herida, controlar la temperatura y pH local, proteger la herida de infecciones e invasiones microbianas, aplicar medicación a la herida en algunos casos, no ser tóxico ni alérgico y ser

de fácil aplicación y remoción (Rohani Shirvan & Nouri, 2020). Los apósitos para heridas están hechos de fibras de algodón, seda, poliéster, poliamida, poliuretano, politetrafluoroetileno, alginatos, celulosa regenerada, quitina, quitosano, hialuronano, etcétera (Rohani Shirvan & Nouri, 2020). Otro material para aplicación externa son las vendas que pueden ser fabricadas de algodón o viscosa con tejidos planos, tejidos tricot o punto o por no tejidos, además pueden ser elásticas y no elásticas, y que se cortan en forma de tiras para posteriormente limpiarlas, blanquearlas y esterilizarlas para su uso (Horrocks & Anand, 2016a).

Por otro lado, los materiales para aplicaciones internas se refieren a dispositivos implantables, prótesis y *scaffolds* que son colocados dentro del cuerpo humano y que pueden ser o no absorbibles (Rohani Shirvan & Nouri, 2020). Los implantes imitan las estructuras nativas del cuerpo, son diseñados con estabilidad dimensional localizada, elasticidad, porosidad y otras especificaciones técnicas según se requiera para su la aplicación, aparte de ello, deben ser biocompatibles, no tóxicos, antialérgicos y antibacterianos. Como ejemplo de materiales implantables de base textil tenemos a las válvulas cardíacas, malla para hernias, ligamentos y articulaciones artificiales e injertos vasculares (Horrocks & Anand, 2016a; Rohani Shirvan & Nouri, 2020).

El último grupo de materiales textiles médicos para aplicación de interfaz interna/externa se colocan fuera del cuerpo humano, pero están en contacto directo con la sangre humana (Rohani Shirvan & Nouri, 2020). Dentro de estos tenemos a los dispositivos extracorpóreas que son órganos mecánicos como el pulmón mecánico, riñón e hígado artificial que son empleados para purificar y filtrar la sangre en el cuerpo; otros materiales son las suturas que se utilizan en diferentes aplicaciones quirúrgicas, son hilos de monofilamento o multifilamento que pueden ser o no biodegradables, se emplean para unir los vasos sanguíneos en la cicatrización de una herida, aproximar tejidos y para el cierre de heridas internas utilizando suturas biodegradables o heridas externas con suturas no biodegradables que se retiran cuando la lesión está curada (Horrocks & Anand, 2016a; Rohani Shirvan & Nouri, 2020).

8) Transporte marítimo, aeroespacial y ferroviario (*Mobiltech*)

Los textiles de *Mobiltech* se emplean como materiales para construcción, equipamiento y mobiliario de ferrocarriles, automóviles, camiones pesados, barcos, aviones y naves

espaciales (Aldalbahi et al., 2021), en cuanto a textiles se refiere, cada uno de estos sectores tienen sus propios requisitos en términos de diseño, color, características de la superficie del tejido, precio, peso, densidad, permeabilidad al aire, abrasión, entre otros (Hardcastle, 2020). En el mercado del transporte, el cambio de enfoque en el producto hacia un enfoque centrado en el consumidor generó muchas demandas en las medidas de seguridad, estilo y atractivo de interiores, pesos ligeros para el ahorro de combustible y alta durabilidad (Elmogahzy, 2020). Aparte de ello, los medios de transporte se han clasificado como el mayor consumidor de textiles de alto rendimiento como son las bolsas de aire de seguridad, fundas de asientos, alfombras, cinturones de seguridad, neumáticos de alta gama, etc., (Aldalbahi et al., 2021; Hardcastle, 2020).

Una bolsa de aire es un dispositivo inflable cuya aplicación es proteger a los ocupantes del vehículo de lesiones graves en accidentes de tránsito, estas bolsas tienen tres partes principales, la bolsa de aire en sí, un inflador y un propulsor (Elmogahzy, 2020). El textil de la bolsa de aire es una tela tejida que puede tener diferentes formas y tamaños según los requisitos específicos del vehículo, el diseño normal de la bolsa de aire del conductor y del pasajero son las formas de círculo y lágrima, respectivamente, los cuales constan de varias piezas que son cosidas interna y externamente utilizando fibras de nylon 66, poliéster o aramida (Elmogahzy, 2020). La tela de la bolsa de aire cumple ciertas características de rendimiento como tener resistencia al desgarramiento, tenacidad y soportar altas temperaturas de inflado, además debe permitir la liberación de gases y no dejar pasar productos químicos a través de ella que puedan quemar la piel de las personas, esto implica una óptima permeabilidad y bloqueo, otra de sus características es la capacidad de plegarse y desplegarse con facilidad, para ello se requiere que tenga un peso ligero y que sea de alta flexibilidad y estabilidad al envejecimiento, finalmente la bolsa de aire debe constar de una superficie suave y lisa que proporcione un ligero efecto de amortiguamiento al ocupante en el momento del accidente (Elmogahzy, 2020; Horrocks & Anand, 2016a). Las principales fibras empleadas para la elaboración de las bolsas de aire son el poliéster y la poliamida como nylon 66, además de estas existen otras fibras alternativas de mejor rendimiento como la aramida, nylon 4,6 y poliéster modificado, pero su principal obstáculo de uso es su costo (Elmogahzy, 2020).

Por otro lado, en la industria automotriz la cantidad total de textiles utilizados por automóvil es de alrededor de 18 kg, representando en peso el 18% en telas para los asientos, 22% en alfombras, 30% en neumáticos, amortiguación acústica y otros elementos de interior,

y 30% en materiales textiles compuestos; asimismo, las fibras más empleadas en este sector son el acrílico, modacrílico, nylon 6, nylon 66, poliéster, polipropileno, lana y algodón (Hardcastle, 2020).

Con respecto a las telas empleadas en el interior del automóvil, estas son sometidas a rigurosas pruebas dependiendo su uso final, algunas de las pruebas son la abrasión superficial que es evaluada con estándares de mayor severidad que los requeridos por las telas de tapicería tradicionales; la solidez a la luz y degradación puesto que el textil está sujeto altas cantidades de luz y calor que puede llegar hasta 120°C en zonas de climas cálidos; la inflamabilidad que generalmente es menos severa que para buses públicos, aviones y cruceros; la resistencia a la tracción, desgarró y costura; y entre otras pruebas (Hardcastle, 2020).

9) Protección del medio ambiente (*Oekotech*)

Esta área tiene conceptos interesantes en protección del medio ambiente, eliminación de residuos y reciclaje. Los textiles *Oekotech* se superponen con otros grupos de textiles de alto rendimiento como los de *Indutech* en filtros, *Geotech* en la protección contra la erosión y sellado de desechos tóxicos y *Agrotech* para reducir la pérdida de agua del suelo y disminuir el uso de herbicidas (Aldalbahi et al., 2021). Algunas innovaciones textiles para la protección del medio ambiente son: los textiles repelentes al agua, respirables y de baja inflamabilidad cuya fórmula de acabado es sin formaldehído; las fibras a base de celulosa obtenidas de materia prima sostenible; alfombras hechas con zapatillas viejas recicladas; no tejidos de material reciclado fabricados a partir de botellas de polietileno tereftalato (PET) y fibras de madera; hilos de acrílicos obtenidos de toldos 100% reciclados; textiles sostenibles donde su proceso de teñido y funcionalización son extractos y enzimas de hongos y plantas; y entre otras innovaciones (Techtextile, 2020).

Según Shirvanimoghaddam *et al.* (2020), en las últimas décadas ha habido un aumento constante de la producción y consumo de textiles y fibras debido a la alta tasa de crecimiento demográfico y a la mejora de los salarios y niveles de vida, siendo los mayores consumidores de textiles en el mundo los países de Estados Unidos, Australia y los de Europa Occidental con 37, 27 y 22 kg por usuario cada año (Shirvanimoghaddam et al., 2020). La industria textil consume gran cantidad de energía y recursos naturales, lo que contribuye a la rápida generación de residuos de posconsumo que son productos fibrosos descartados después de

su vida útil y se pueden generar en los hogares, comercio, industria y otras fuentes (Shirvanimoghaddam et al., 2020). Aparte de ello, esta misma industria enfrenta enormes desafíos ambientales y de recursos en vista de que genera una huella ambiental que abarca desde el cultivo, fabricación de hilos, tejidos, vestimenta, otros y hasta la eliminación en rellenos sanitarios de residuos de posconsumo, por ello es importante que la industria textil adopte un comportamiento más sostenible (Shirvanimoghaddam et al., 2020). La reutilización y el reciclaje de residuos, especialmente de textiles está aumentando con gran rapidez, algunos ejemplos de la aplicación de textiles reciclados se pueden encontrar en la industria de la construcción como aislamiento térmico y acústico, conductividad y fabricación de hormigón y ladrillos más ligeros; en la industria automovilística como red de aislamiento acústico y térmico, o en la fabricación de piezas prensadas para revestimientos de asientos y fieltros inferiores para alfombras; en la industria agrícola como capa para cubrir la superficie del cultivo o como cobertura y banda transportadora de semillas; en la industria del mueble como materiales de tapicería, guata y para fabricar fundas de colchón; en la industria de la moda empleada para la confección de nuevos productos textiles; y para aplicaciones ambientales como catalizador sostenible y económico en tratamiento del agua empleando desechos de algodón y en la eliminación de bisfenol en aguas residuales (Shirvanimoghaddam et al., 2020).

10) Protección y seguridad personal (*Protech*)

Los textiles dentro de esta área están diseñados para mejorar la seguridad de los trabajadores, su protección funcional debe brindar resguardo contra puñaladas, explosivos, fuego, mal tiempo, cortes, temperaturas extremas, voltaje elevados, partículas diminutas, riesgos químicos, biológicos y nucleares, además de ello, esta ropa de protección técnica se emplea para afrontar peligros como alta temperatura en el caso de los bomberos, radiación de reactores nucleares, descargas eléctricas, impactos de metal, chispas en los procesos de soldadura, ambientes altamente ácidos o alcalinos, impactos de bala, y entre otros (Aldalbahi et al., 2021).

Por causa de las modernas operaciones militares, tácticas de guerra impulsadas por la tecnología y el uso de armas y municiones en las calles se están desarrollando sistemas de blindaje de protección balística que son resistentes, flexibles, livianos y con gran capacidad de absorción de energía (Abteu et al., 2019). A finales de la década de 1960 surgieron los

chalecos antibalas luego de la fabricación de nuevas fibras sintéticas con rendimiento antibalístico, después de ello, se realizaron investigaciones continuas de manera que se produjeron otros materiales balísticos de fibras con diferentes propiedades mecánicas que podían ser aplicados no solo como ropas de protección para el personal militar y policial, sino también como blindaje de vehículos, en estructuras externas de aeronaves, como material de resistencia contra proyectiles de alta velocidad, entre otros (Abtew et al., 2019).

El sistema de armadura corporal de resistencia balística protege el cuerpo de quien los lleve, impidiendo la penetración del proyectil y absorbiendo la energía cinética generada por este mismo proyectil de manera que, lo convierte en otras formas de mecanismos de absorción balística como deformación, daños superficiales, tensión en hilos primarios, deformación de hilos secundarios, agrietamiento de la matriz, etc. (Abtew et al., 2019). Las formas de aplicación de las fibras de alto rendimiento son como telas tejidas en 2D y 3D, no tejidas, refuerzos tejidos y no tejidos en compuestos de matrices poliméricas. Dentro de los tipos más comunes de fibras poliméricas de alta resistencia y módulo encontramos a las fibras de vidrio, carbono, cerámica, poliéster aromático, para-aramida y polietileno de ultra alto peso molecular, estas dos últimas fibras son conocidas en el mercado debido a su alta resistencia al daño por impacto (Abtew et al., 2019; Horrocks & Anand, 2016a). Entre las fibras comerciales del grupo para-aramida tenemos al *Kevlar* y *Twaron*, en el grupo de polietileno están el *Dyneema* y *Spectra* que además de ser altamente resistente tienen alta tenacidad y buena resistencia química (Abtew et al., 2019).

11) Deportes y ocio (*Sporttech*)

Los textiles *Sporttech* fueron diseñados para ser usados en calzado, ciclismo, pesca con caña, deportes de verano e invierno, deportes acuáticos como vela, alpinismo y equipamiento deportivo como raquetas y palos de golf, además de ser empleados en cuadros de bicicletas, paracaídas, parapentes, etc. (Aldalbahi et al., 2021). Algunas innovaciones en esta área son: ropa y calzado delgados y flexibles con capacidad de ser calentados por conexión USB; chaleco hidrostático para buceadores con efecto loto; canoa kayak inflable con tejido espaciador de fibra de poliéster; hilos metálicos revestidos, flexibles, antiestáticos, tolerantes a la piel empleados para transmisión de datos; textiles inteligentes a base de fibra óptica polimérica, flexibles y lavables; bicicletas de carrera ligeras y robustas construido con fibras minerales que son más baratas que las fibras de carbono; calzado deportivo tejido con hilo

enfundado, resistencia a la luz y al envejecimiento; tabla de *snowboard* con unión de fibras de lino, ligeras y de bajo costo; y casco de *snowboard* con sistema de calefacción y LED integrados para una mejor visibilidad (Techtextile, 2020).

Una de las principales preocupaciones de los participantes en diferentes deportes es la prevención de lesiones en la cabeza, los cuales pueden originar costos físicos, cognitivos, emocionales y financieros (Piland et al., 2019; Shishoo, 2015). Las lesiones en la cabeza ocasionadas en algún deporte pueden ser lesiones estructurales visibles en el cráneo, mandíbula y tejidos blandos o algún daño cerebral traumático leve conocido también como conmociones cerebrales relacionadas con el deporte (Piland et al., 2019). La mayoría de estas lesiones suelen ser el resultado de fuerzas biomecánicas generadas por la colisión de la cabeza hacia alguna superficie del juego a hacia otro jugador o también por la colisión de algún objeto del juego, como una pelota, a la cabeza (Piland et al., 2019). En este sentido la prevención de traumatismos craneoencefálico haciendo uso de cascos de protección no sólo en el deporte sino también en las actividades recreativas es de suma importancia.

En el caso del casco deportivo, las innovaciones de diseño, materiales de fabricación y cumplimiento de estándares de rendimiento y seguridad han mejorado su comodidad, confiabilidad, y capacidad de protección (Piland et al., 2019). Estos cascos deportivos generalmente están compuestos de una carcasa exterior, una carcasa interior responsable de absorber rápidamente la energía de impacto transferida desde la carcasa exterior, y un componente de protección facial en ciertos casos (Shishoo, 2015). La carcasa exterior está hecha de material polimérico como el policarbonato, acrilonitrilo-butadieno-estireno y poliolefinas (Piland et al., 2019). La carcasa interna tiene una capa de espuma o estructura textil, esta espuma puede ser de diferente densidad, elasticidad y característica de absorción de energía, además de ello, está diseñada y fabricada para cumplir no sólo con los requisitos de la intensidad de impacto sino también con la comodidad del atleta, por otro lado, la espuma debe ser resistente a impactos múltiples de alta intensidad y volver rápidamente a su forma original; entre la familia de espumas tenemos al poliuretano, cloruro de polivinilo, polietileno, polipropileno, poliestireno, y entre otros (Piland et al., 2019; Shishoo, 2015).

12) Embalaje (*Packtech*)

Esta área incluye innovaciones significativas en embalaje, contenedores, revestimiento y transporte amplio de mercancías (Aldalbahi et al., 2021). El desarrollo de sacos y bolsas

fabricados a partir de yute, lino, algodón y últimamente de polipropileno son algunas de las aplicaciones de este tipo de textiles, aparte de ello, el manejo, almacenamiento y distribución con mayor eficiencia de diversos productos granulados y en polvo como arena, cemento, harina, azúcar, fertilizantes, pigmentos y colorantes es posible gracias a la innovación de textiles de alto rendimiento surgidos sobre la base de técnicas modernas de manejo de sustancias (Aldalbahi et al., 2021). En la industria alimentaria se emplean las mallas tejidas para envasar frutas y verduras, y tejidos livianos de punto y no tejidos son usados como bolsas para té y café (Aldalbahi et al., 2021).

Algunas innovaciones de textiles *packtech* para el transporte y embalaje son: sacos resistentes y flexibles para residuos verdes hechos con tejidos de polietileno; contenedores de carga, ligeros, resistentes al fuego y calor, fabricados con fibras de aramida; materiales de embalaje sostenible, robusto y ligeros, hechos con desperdicios de plumas; carrito de cocina de aviones a base de fibras de lino para el reemplazo de las fibras de carbono y vidrio; redes de carga cuyas fibras se sumergen en plástico y se tratan con infrarrojo en un solo proceso; cuerdas para helicópteros ligeros y de mayor carga útil, hechos con tejido textil para sustituir cables de acero; eslinga de rescate en helicóptero para personas y animales; y entre otras innovaciones (Techtextile, 2020).

La información presentada en la sección 2.1.1.1. muestra que los textiles técnicos o de alto rendimiento están teniendo una rápida expansión y crecimiento comercial, y cuyas aplicaciones van creando muchas oportunidades para realizar innovaciones en diferentes áreas, además de ello, se debe tener en cuenta la importancia de someterlos a uno o más tratamientos de acabados con la finalidad de mejorar aún más su apariencia, es por ello que en la siguiente sección se estudiará diferentes tipos de acabados textiles.

2.1.2. Acabados textiles

Los acabados textiles son una parte fundamental en la fabricación de los productos textiles e involucran procesos para mejorar la apariencia y utilidad de los textiles, el acabado generalmente se efectúa en la etapa final del procesamiento textil y como resultado los textiles adquieren varias características funcionales (Roshan, 2015). Los acabados se pueden aplicar principalmente en tejidos de punto, plano o no-tejidos, o cuando el textil está en forma de hilo o prenda (Haule & Nambela, 2022). En consecuencia, el acabado le da al textil

su carácter comercial final y propiedades estéticas como apariencia, brillo, tacto, caída, y facilidad de uso, además, puede cambiar varias propiedades físicas y químicas de los materiales textiles según las necesidades del consumidor (Choudhury, 2017; Haule & Nambela, 2022). En las secciones del 2.1.2.1 al 2.1.2.5 serán descritos los diferentes tipos de acabados.

2.1.2.1. Acabados físicos o mecánicos

Los acabados físicos o mecánicos cambian las características físicas de los tejidos, la mayoría de ellos se conocen desde la antigüedad y no se han producido muchos cambios en su método de funcionamiento (Horrocks & Anand, 2016b). Existen diversos acabados mecánicos como el calandrado, decatizado, sanforizado, chamuscado, cepillado, perchado, tundido, entre otros (Choudhury, 2017; Horrocks & Anand, 2016b), algunos de ellos serán descritos a continuación:

a) Calandrado

Es la modificación de la superficie de un tejido por la acción del calor y la presión, se realiza con la finalidad de impartir brillo y suavidad al tejido (A. Bernhard et al., 2022; Majumdar et al., 2013). Este acabado se obtiene pasando el tejido entre los cilindros giratorios calentados de una máquina de calandrado, tanto la velocidad de rotación como la presión aplicada por los cilindros son variables (Horrocks & Anand, 2016b; Majumdar et al., 2013). La superficie de los cilindros puede ser lisa o rugosa para proporcionar el acabado adecuado al tejido, además, pueden ser de diferentes materiales, desde acero templado hasta termoplástico, asimismo, la máquina de calandrado consta de entre 2 a 16 cilindros y estos cilindros giran bajo presión mecánica, neumática o hidráulica ajustable (A. Bernhard et al., 2022; Majumdar et al., 2013).

b) Decatizado

El decatizado es un proceso de acabado que se utiliza principalmente para mejorar ciertas características como la apariencia, forma, tacto, brillo y suavidad de tejidos de lana y de otros materiales como mezclas con lana, poliéster, lino y algodón (Ferro et al., 2020;

Horrocks & Anand, 2016b; Senthil Kumar & Sundaresan, 2013). El decatizado ayuda a estabilizar las dimensiones de la tela y minimizar el encogimiento en el producto final (Horrocks & Anand, 2016b). La decatización se realiza mediante vaporización a presión, es decir, sometiendo un tejido bien compactado o firmemente enrollado a un tratamiento con vapor (Ferro et al., 2020; Senthil Kumar & Sundaresan, 2013). El tejido a decatizar se enrolla sobre un cilindro perforado de acero inoxidable, luego el vapor pasa desde el interior del cilindro perforado a través de las capas enrolladas durante un tiempo específico (Babu, 2019).

c) Sanforizado

El sanforizado es un proceso de encogimiento controlado por compresión, este acabado minimiza el encogimiento del tejido después de los ciclos de lavado, especialmente en textiles a base de algodón o tejidos de mezcla de poliéster con mayor porcentaje de algodón (Horrocks & Anand, 2016b). Este proceso mecánico involucra la compresión de un textil entre un cilindro de acero calentado y una manta de goma gruesa extensible y se lleva a cabo después de que el tejido es humedecido con agua o vapor a temperatura elevada, con este acabado se reduce el encogimiento del producto final, mas no se elimina por completo (Choudhury, 2017; Horrocks & Anand, 2016b).

d) Chamuscado

El chamuscado consiste en quemar los extremos libres de cualquier fibra suelta o levantada en la superficie de un tejido utilizando una llama alimentada por gas o por radiación infrarroja, con el objetivo de crear un tejido con superficie suave y reducir la formación de *pilling* (El Mogahzy, 2020; Horrocks & Anand, 2016b). Para este acabado, la tela se pasa a alta velocidad sobre las llamas o entre placas de metal calentadas para evitar que los hilos se quemen (El Mogahzy, 2020). Generalmente, el chamuscado se usa en tejidos hechos con hilos de fibra cortada como el algodón; en tejidos fabricados con filamentos continuos no se requiere este acabado, tampoco en tejidos hechos con fibras termoplásticas porque resultaría en la fusión de las fibras; en el caso de los tejidos de lana, se usa cizallamiento o recorte de fibras, ya que chamuscar las fibras de lana puede producir un fuerte olor a azufre (El Mogahzy, 2020).

2.1.2.2. Acabados químicos

Los acabados químicos implican el uso de productos químicos o auxiliares para lograr una propiedad específica en un tejido, estos acabados incluyen procesos que cambian la composición química de los tejidos a los que se aplican (Haule & Nambela, 2022; Schindler & Hauser, 2004). Regularmente, el acabado químico tiene lugar después del teñido o estampado del tejido y antes de producir prendas u otros artículos textiles, no obstante, se pueden aplicar con éxito a hilos o prendas (Haule & Nambela, 2022; Schindler & Hauser, 2004). Estos tipos de acabados pueden ser duraderos, vale decir que, al someter los textiles acabados a lavados repetidos en húmedo o seco no pierden la eficacia, o no duraderos, básicamente, cuando los tejidos no se lavan ni se limpian en seco o cuando se requiere de una propiedad temporal; dependiendo del tipo de acabado químico, material textil y disponibilidad de equipos, los acabados se pueden aplicar principalmente por los métodos textiles de impregnación, agotamiento, recubrimiento, pulverización, otros (Haule & Nambela, 2022).

Los agentes de acabados químico de uso frecuente son antiestáticos, suavizante, repelentes al agua y aceite, inarrugables, fotoprotectores, incogibles e hidrófugo, de fácil cuidado, autolimpiables, resistentes a olores, superabsorbentes, de regulación térmica, y entre otros (Eid & Ibrahim, 2021; Horrocks & Anand, 2016b; Schindler & Hauser, 2004). A continuación, serán descritos algunos de estos acabados:

a) Acabado antiestático

En los procesos textiles secos, tanto las fibras como los tejidos se mueven a altas velocidades sobre diversas superficies, ello puede generar cargas electrostáticas a partir de las fuerzas de fricción (Horrocks & Anand, 2016b; Schindler & Hauser, 2004). Esta carga eléctrica puede ocasionar que las fibras e hilos se repelan entre sí, lo que provoca que se hinchen, también en los tejidos y no-tejidos estas cargas pueden generar problemas en el manejo de materiales (Schindler & Hauser, 2004; Su et al., 2020). La generación de estática hace que los filamentos, hilos y tejidos se adhieran a superficies adyacentes, aparte de ello, la electricidad estática predomina en fibras sintéticas debido a su carácter hidrofóbico, mientras que en las fibras naturales no tanto porque contienen un pequeño porcentaje de agua que actúa como conductor eléctrico (Horrocks & Anand, 2016b). La aplicación de

agentes antiestáticos disminuye o elimina de forma significativa la generación de electricidad estática en la superficie textil (Horrocks & Anand, 2016b; J. Wang & Mahltig, 2022).

El mecanismo de los acabados antiestáticos son aumentar la conductividad de la superficie de la fibra y reducir las fuerzas de fricción mediante la lubricación (Schindler & Hauser, 2004; J. Wang & Mahltig, 2022). Los productos químicos antiestáticos pueden ser duraderos o no duraderos una vez aplicados al textil, entre los agentes antiestáticos duraderos está el carbón conductor o partículas metálicas aplicadas junto con aglutinantes, poliaminas, sales de amonio y sales carboxílicas; para el caso de los agentes antiestáticos no duraderos deben ser de baja volatilidad, baja inflamabilidad, no amarillentos, no corrosivos y de baja formación de espuma, este antiestático incluye tensioactivos, sales orgánicas, sales de amonio cuaternario, imidazoles, amidas grasas, fosfatos, ésteres de fosfatos, sulfatos, glicoles, polietilenglicoles, compuestos de óxido de polietileno, etc. (Mao & Russell, 2015; Schindler & Hauser, 2004; J. Wang & Mahltig, 2022).

b) Suavizantes

Los acabados suavizantes son los más importantes de los tratamientos químicos textiles posteriores, su aplicación confiere a los textiles un tacto suave, flexible y mejoran su caída (Choudhury, 2017; Schindler & Hauser, 2004). El principal efecto de los suavizantes es sobre la superficie de las fibras, sin embargo, hay algunas moléculas pequeñas que pueden penetrar las fibras y proporcionar una plastificación interna del polímero (El-Sayed, Mowafi, & Basuoni, 2022; Schindler & Hauser, 2004). La disposición física de las moléculas suavizantes depende de su naturaleza iónica y de la hidrofobicidad de la superficie de la fibra, por ejemplo, los suavizantes catiónicos se orientan con sus extremos cargados positivamente hacia la fibra parcialmente cargada negativamente creando una nueva superficie de cadenas hidrofóbicas de carbono que brindan la excelente suavidad y lubricidad; los suavizantes aniónicos se orientan con sus extremos cargados negativamente y son repelidos por la superficie de la fibra cargada negativamente, conduciendo con ello a una mayor hidrofiliidad pero con menos suavidad, por otro lado, los suavizantes no iónicos se orientan dependiendo de la naturaleza de la superficie de la fibra (El-Sayed, Mowafi, & Basuoni, 2022; Schindler & Hauser, 2004; Sivaramakrishnan, 2013). Los suavizantes en su mayoría consisten en moléculas con partes hidrofóbicas e hidrofílicas, por tanto, se clasifican

como agentes tensioactivos, asimismo, estos productos tienen baja solubilidad en agua y por ello se venden como emulsiones de aceite en agua que contienen 20-30% de sólidos (Fahmy et al., 2022; Schindler & Hauser, 2004).

c) Repelentes al agua y aceite

Los acabados repelentes logran sus propiedades al reducir la energía libre de las superficies de las fibras, cuando las interacciones adhesivas entre una fibra y una gota de líquido colocada sobre esta fibra son mayores que las interacciones cohesivas internas del líquido, la gota se esparce; y cuando las interacciones adhesivas entre la fibra y la gota son menores que las interacciones cohesivas internas del líquido, la gota no se esparce, por lo tanto, las superficies que tienen interacciones bajas con líquidos son conocidas como superficies de baja energía (Haule & Nambela, 2022; Schindler & Hauser, 2004).

Los acabados químicos repelentes al agua y aceite desarrollan superficies de baja energía y por ello confieren propiedades hidrofóbicas y oleofóbicas a la superficie del tejido aplicado (Haule & Nambela, 2022). Para impartir al textil propiedades repelentes al agua y aceite, se utilizan productos basados en fluorocarbono, sin embargo, estos productos químicos no son duraderos ni tampoco amigables con el medio ambiente, son costosos y también pueden afectar el manejo estético del textil (Choudhury, 2017; Haule & Nambela, 2022). Los acabados químicos repelentes al agua aplicados a tejidos pueden aumentar el ángulo de contacto del agua con la superficie del textil de manera que sea mayor a 90°; los agentes repelentes al agua incluyen sustancias que tienen baja tensión superficial, como ceras, dispersiones de cera, complejos de cromo, siliconas, entre otros (Mao & Russell, 2015; Mbamkeu Chakounté et al., 2022).

2.1.2.3. Acabados biotecnológicos

En la industria textil se utilizan las enzimas como agentes biológicos para tratar y modificar fibras, especialmente en el transcurso del pretratamiento y acabado de los materiales textiles (Eid & Ibrahim, 2021; Roshan, 2015). Entre las enzimas que se utilizan en el pretratamiento textil tenemos a la enzima lipasas que son biocatalizadores que se pueden aplicar en la hidrólisis de fibras sintéticas y en el biodescrudado junto con la enzima pectinasa (Madhu & Chakraborty, 2017; Paul & Genescà, 2013). Las pectinasas son un

grupo de enzimas que hidrolizan sustancias pépticas presentes en plantas, son producidas de forma natural por organismos como hongos, insectos, bacterias, levaduras, protozoos y plantas; se utilizan en procesos industriales textiles como biodescudado, y las amilasas que son enzimas que degradan el almidón y se emplean en el proceso de desengomado de tejidos (Eid & Ibrahim, 2021; Madhu & Chakraborty, 2017; Paul & Genescà, 2013).

Algunos de los acabados biotecnológicos está el biopulido enzimático que se lleva a cabo antes, durante y después del teñido, en este acabado se elimina la pelusa y las aglomeraciones de fibras en la superficie textil, como resultado se produce una superficie limpia, de tacto suave y con mejor brillo (Roshan, 2015; Sheikh & Bramhecha, 2019). Para este acabado se pueden usar las enzimas celulasas sobre tejidos de algodón, las cuales son capaces de hidrolizar las microfibrillas que sobresalen de la superficie del material textil, cuando las microfibrillas se desprenden de la fibra, dejan una superficie más suave, y después del tratamiento, el tejido presenta una menor tendencia de formación de *pilling* (Roshan, 2015; S. Singh & Khajuria, 2018; Vajpayee et al., 2023).

Otra enzima que se puede utilizar es la transglutaminasa, su aplicación sobre textiles a base de lana mejora el tacto, suavidad, humectabilidad, absorción del colorante, así como también, incrementa su resistencia al encogimiento y aumenta la protección de la fibra contra daños provocados por el uso de detergentes comunes (Eid & Ibrahim, 2021; Roshan, 2015).

En mezclas de fibra de poliéster/algodón, el biopulido se puede utilizar como una técnica novedosa para desarrollar nuevos tonos. Las proteasas son enzimas degradativas que catalizan la hidrólisis total de proteínas, se clasifican en exopeptidasas y endopeptidasas; la primera ataca los extremos de las moléculas de proteína y, la segunda desdobla los enlaces peptídicos dentro de las cadenas polipeptídicas; las proteasas se utilizan en la industria textil como acabados para disminuir el fieltro y encogimiento de artículos de fibra de lana, así como para otorgar mayor suavidad y mejor capacidad de teñido a la lana (Madhu & Chakraborty, 2017; Paul & Genescà, 2013). Las fibras de poliéster son hidrofóbicas, esta característica dificulta la aplicación de tintes y acabados, con el uso de las enzimas de lipasas y estererasas se mejora la actividad hidrolítica del poliéster (Paul & Genescà, 2013).

Entre las ventajas del empleo de enzimas en la industria textil se tiene el menor consumo de energía y se evita el uso de productos químicos agresivos, por otro lado, la implementación de enzimas tiene obstáculos debido a su baja estabilidad, baja compatibilidad con otros agentes químicos, mayor tiempo de procesamiento y costo alto (Eid & Ibrahim, 2021; Roshan, 2015).

Aparte de los acabados mecánicos, químicos y biotecnológicos descritos en las secciones del 2.1.2.1 al 2.1.2.3, existen otros acabados en su función de protección al usuario y a los propios materiales textiles.

2.1.2.4. Acabados de protección al usuario y textiles

En este grupo tenemos a los acabados repelente de insectos, protección balística y punzante, antimicrobianos, protección ultravioleta, protección de radiación, protección biológica y química, acabados retardante de llama, y entre otros. Algunos de estos acabados son expuestos a continuación:

a) Acabados repelentes de insectos

Los textiles repelentes de insectos protegen a los seres humanos de la picadura de mosquitos, de esta forma se previene contraer las enfermedades transmitidas por vectores como dengue, malaria, chikungunya, etc., especialmente en regiones con climas tropicales (Roshan, 2015; Roy Choudhury, 2017; Türkoğlu et al., 2020). El producto químico utilizado más ampliamente es el N,N-dietil-meta-toluamida (DEET) que tiene la capacidad de repeler insectos y mosquitos, este producto fue desarrollado y patentado por el ejército de los Estados Unidos en 1946 para uso del personal militar en áreas infestadas de insectos (Roshan, 2015; Roy Choudhury, 2017; Xin & Wang, 2018).

Otra sustancia química repelente es la permetrina que se aplica a los textiles, además de estos productos, en últimos años se vienen investigando varios repelentes de insectos derivados de fuentes naturales (Roshan, 2015; Türkoğlu et al., 2020; Xin & Wang, 2018). Los tejidos tratados con repelentes de insectos brindan protección contra los insectos, pero carecen de ofrecer una actividad prolongada, por el contrario, un tejido tratado con repelentes de insectos microencapsulados aportan una protección duradera contra mosquitos y otros insectos (Roshan, 2015; Xin & Wang, 2018).

b) Protección balística y punzante

La protección balística o punzante se atribuye a los textiles multicapa que contienen fibras de alto rendimiento, por ejemplo, los chalecos antibalas son estructuras de tela laminada o

tejida de varias capas, un chaleco convencional tiene entre 20 a 50 capas de tejidos, estos tejidos son fabricados con fibras de alto rendimiento como el para-aramida (*Kevlar* y *Twaron*), fibras de polietileno de alto rendimiento (*Dyneema* y *Spectra*), nylon de alta tenacidad y PBO (*Zylon*) (Bautista, 2015; Dewangan & Panigrahi, 2021).

Generalmente, para aumentar la resistencia balística de los chalecos antibalas se añade más capas de tejido de alto rendimiento que deben ser cosidas o laminadas juntas o también se pueden insertar cerámicos rígidos, como consecuencia, los chalecos reducen la movilidad del usuario, son pesados e incómodo, por tal motivo, se vienen dando varias soluciones tecnológicas, pero la mayoría de ellas aún se encuentran en etapa de investigación (Bautista, 2015; Dewangan & Panigrahi, 2021; Wei et al., 2021).

Una de las tecnologías más prometedoras para obtener un chaleco antibalas suficientemente flexible y con resistencia balística y punzante, es la aplicación sobre los textiles fabricados con fibras de alto rendimiento de productos a base de fluidos espesantes por cizallamiento (STF por sus siglas en inglés), que consisten principalmente en nanopartículas altamente concentradas dispersas en líquidos (Bautista, 2015; Roshan, 2015). Los STF pueden absorber gran cantidad de energía de impacto, complementando así la energía absorbida por los textiles multicapa livianos de alto rendimiento; la producción de tejidos acabados con STF se lleva a cabo por procedimientos sencillos de impregnación que se aplican a tejidos de alto rendimiento (Bautista, 2015; Dewangan & Panigrahi, 2021).

c) Acabados antimicrobianos

La palabra antimicrobiano significa acción de la inhibición del crecimiento o la destrucción de microorganismos (RAE, 2022b; Roy Choudhury, 2017). En consecuencia, el acabado antimicrobiano aplicado sobre materiales textiles protege a los usuarios de varios microorganismos que causan problemas e infecciones médicas e higiénicas (Haule & Nambela, 2022; Rohani Shirvan & Nouri, 2020). Los beneficios más importantes de los materiales textiles funcionalizados con acabados antimicrobianos está el evitar infecciones causadas por microorganismos patógenos y parásitos; prevenir la formación de olores; proteger los productos textiles de manchas, decoloración y deterioro de la calidad; y controlar la contaminación por microbios (Haule & Nambela, 2022; Rohani Shirvan & Nouri, 2020). Los acabados antimicrobianos se pueden dividir en dos tipos: (a) acabado antibacteriano que puede ser bactericida o bacteriostático; y (b) acabado antimicrobiano que

puede ser un acabado higiénico de textiles para el hogar (acabado desodorante) y un acabado antimicrobiano de textiles técnicos (acabado germicida o antimicótico de tipo fungicida o fungistático) (Roy Choudhury, 2017).

Los compuestos fenólicos, sales de amonio cuaternario, compuestos organometálicos y compuestos inorgánicos se encuentran entre los agentes antimicrobianos más importantes para producir el acabado textil (Begam, Joshi, & Purwar, 2021; R. M. Kozłowski & Walentowska, 2020; Roy Choudhury, 2017). Los agentes antimicrobianos ideales para aplicarlos a los textiles deben ser de fácil aplicación, incoloro, inodoro, resistentes a los fluidos corporales, resistentes a la esterilización y rentables, adicionalmente, no deben ser tóxicos, alérgicos, cancerígenos y antiestáticos, al mismo tiempo, los agentes antimicrobianos deben tener durabilidad a tratamientos posteriores de textil como el lavado doméstico, lavado en seco y la limpieza (Nortjie et al., 2022; Rohani Shirvan & Nouri, 2020).

Los tejidos y ropa de protección con acabados antimicrobianos son importantes para prevenir la infección por patógenos en los hospitales, escuelas, hogares de ancianos, hoteles y áreas públicas donde se congregan gran cantidad de personas, del mismo modo, los acabados antimicrobianos son cruciales en los tejidos industriales que están expuestos a la intemperie como los toldos, biombos, tiendas de campaña, cuerdas y similares, los cuales necesitan protección contra la putrefacción y el moho; los muebles para el hogar, como colchones, alfombras, cortinas de baño, y tapicería, también reciben acabados antimicrobianos, así como, los textiles en los museos para preservar su conservación (Nortjie et al., 2022; Roy Choudhury, 2017).

2.1.2.5. Otros tipos de acabados

Existen otros tipos acabados textiles que últimamente se están desarrollando con el uso de la tecnología plasma y nanotecnología.

a) Tecnología plasma

El tratamiento con plasma es una técnica efectiva de modificación de superficie que crea características favorables en la superficie del textil para diferentes aplicaciones; esta técnica es seca, sin agua y respetuosa con el medio ambiente, ello en comparación con los métodos convencionales de tratamiento de superficies con disolventes químicos (Mbamkeu

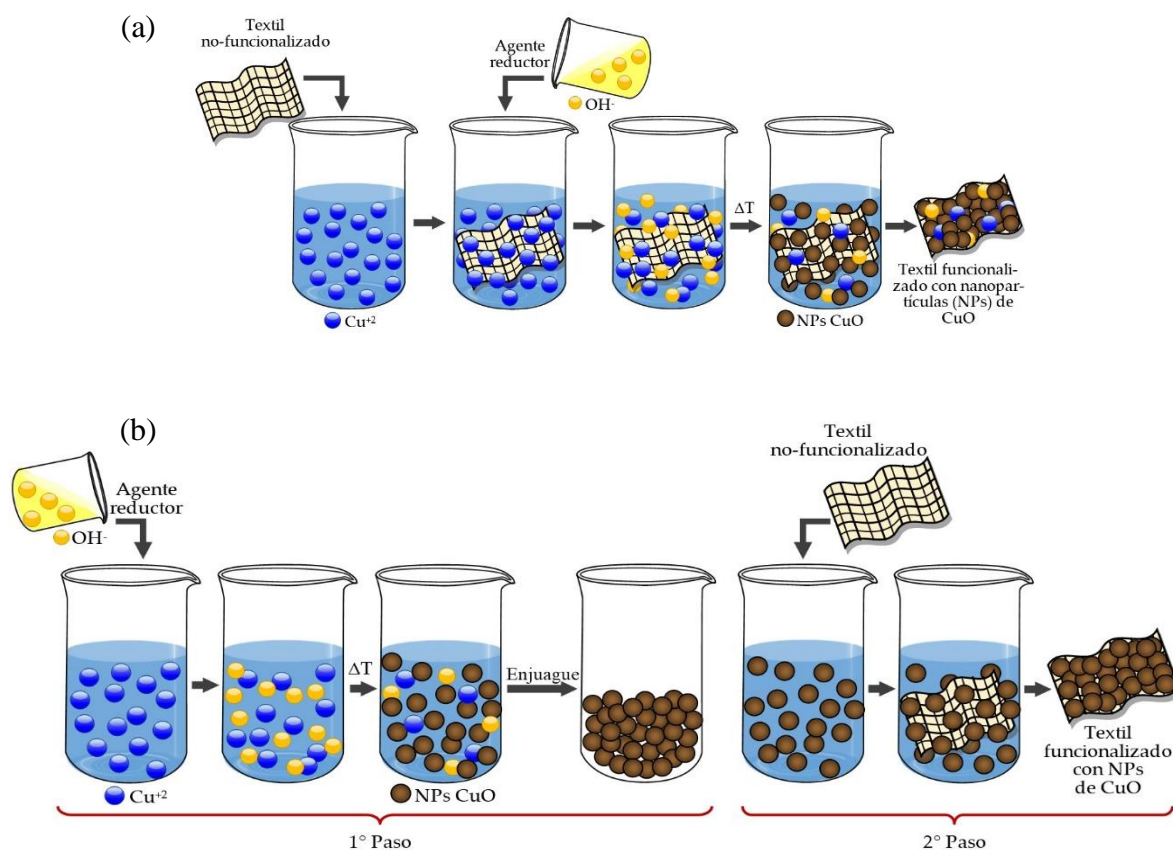
Chakounté et al., 2022; Rohani Shirvan & Nouri, 2020). La eficacia de los tratamientos con plasma varía según el plasma utilizado que pueden ser oxígeno/helio o aire/helio, asimismo, por este tratamiento, en la superficie de los sustratos textiles se genera algunos grupos funcionales que conducen a una mejora significativa en la producción de tejidos técnicos (Naebe, Haque, & Haji, 2022; Rohani Shirvan & Nouri, 2020). El tratamiento con plasma, por ejemplo, se puede utilizar para conferir propiedades antiestáticas a fibras, mejorar la capacidad de teñido o estampación de los textiles, mejorar la funcionalización de superficies de fibras para generar una amplia variedad de usos, entre otros (Horrocks & Anand, 2016b; Naebe, Haque, & Haji, 2022).

b) Nanotecnología

La nanotecnología está creciendo a un ritmo vertiginoso en todos los campos de la ciencia y la tecnología; en la actualidad, la industria textil es uno de los principales clientes de la nanotecnología (Haule & Nambela, 2022; Mangala & Bapan, 2019). La creciente demanda por parte de los clientes consumidores de textiles duraderos, multifuncionales e inteligentes está creando gradualmente oportunidades para el desarrollo de nuevos y mejorados materiales textiles basados en nanotecnología que pueden ser aplicados en diversos campos como médicos, deporte, civiles, automotrices, defensa, electrónica, energía, entre otros (Abou Elmaaty et al., 2022; Mangala & Bapan, 2019). Los materiales textiles con funcionalidades excepcionales se definen como textiles funcionales o de alto rendimiento; los productos textiles mejorados con la nanotecnología van desde nanoacabados o nanorrevestidos hasta nanofibras o fibras nanocompuestas (Abou Elmaaty et al., 2022; Mangala & Bapan, 2019).

La funcionalización de materiales textiles con nanopartículas puede clasificarse en dos métodos: *in situ* (proceso de un solo paso) y *ex situ* (proceso de dos pasos). El método *in situ* consiste en sintetizar las nanopartículas en presencia del material textil y en el método *ex situ* primero se sintetizan las nanopartículas (1° Paso) y luego sigue el segundo paso de aplicación de las nanopartículas sintetizadas en el material textil (2° Paso) (Montazer & Maali Amiri, 2014; L. E. Román et al., 2020; Tamayo et al., 2016).

La Figura 3 muestra esquemas de funcionalización de materiales textiles por los métodos *in situ* y *ex situ*.



Fuente: Adaptado de L. E. Román *et al.*, 2020

Figura 3. Esquema de funcionalización textil por el método: (a) *in situ* y (b) *ex situ*.

Con el uso de la nanotecnología se proporciona multifuncionalidad y se mejora las propiedades especiales de los textiles como superhidrofobicidad (Hasanzadeh *et al.*, 2022), hidrofiliidad (Al-Shatty *et al.*, 2022), anti-arrugamiento (Tripathi *et al.*, 2019), auto-limpieza (Rashid, Simončič, & Tomšič, 2021), ignífugos (N. Li *et al.*, 2022), propiedades antimicrobianas (Bhandari *et al.*, 2022), protección UV (Rashid, Simončič, & Tomšič, 2021), entre otros (Abou Elmaaty *et al.*, 2022; Matos *et al.*, 2017).

Por consiguiente, los textiles aplicados con nanotecnología se utilizan no solo en prendas, sino también en sectores técnicos donde se ofrecen características únicas e innovadoras, por otro lado, en la actualidad, se vienen comercializado muchos productos textiles innovadores aplicados con nanotecnología para competir con los productos comerciales existentes, pero, el alto costo tanto de los nanomateriales, como de los procesos basados en nanotecnología y los problemas ambientales por el uso de algunos nanomateriales, restringe su adopción generalizada, aun así, se espera que la creciente demanda de textiles funcionales y más eficientes impulsen el futuro de los textiles nanotecnológicos (Abou Elmaaty *et al.*, 2022;

Mangala & Bapan, 2019). Aparte de ello, la nanotecnología puede ser usada en la industria textil desde los procesos de acabados textiles hasta la fabricación de las fibras, nanofibras, hilos, etc., (Khandual et al., 2015; T. I. Shaheen, 2022; T. I. Shaheen et al., 2015).

Además de la información dada en 2.1.2.5 b), la nanotecnología puede ser aplicada en diferentes fibras textiles (Abou Elmaaty et al., 2022; T. I. Shaheen, 2022). En la siguiente sección se abordará algunas características de las fibras, haciendo énfasis en las propiedades de la fibra de algodón.

2.1.3. Fibras textiles

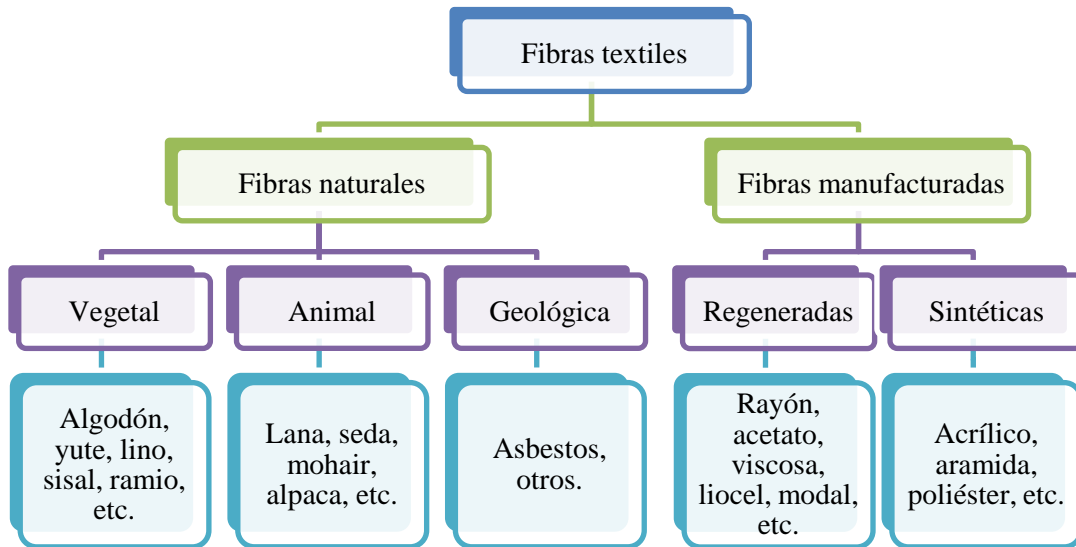
Las fibras textiles son elementos con forma y apariencia de hilo, caracterizadas por su flexibilidad, finura y gran tamaño (Markova, 2019a; Morton & Hearle, 2008). La fibra textil constituye el elemento básico de los tejidos y otras estructuras textiles; es una unidad de materia que se caracteriza por tener una longitud de al menos 100 veces su diámetro, es flexible de modo que puede ser hilada o convertida en una tela por medio de diferentes métodos (Houc, 2009; Markova, 2019a; Peets et al., 2017).

Las fibras difieren entre sí con respecto a la estructura química, forma de la sección transversal, color, ancho y longitud; según este último parámetro, las fibras se clasifican en: (a) filamentos, que son un tipo de fibra con longitud indefinida; o (b) fibras cortadas, que son las fibras naturales o longitudes cortadas de un filamento, cuyos tamaños están entre 1,5 a 8,0 pulgadas de longitud (Houc, 2009; Markova, 2019a).

Las fibras textiles se clasifican en dos grupos: naturales y manufacturadas (Aldalbahi et al., 2021; Peets et al., 2017; Sabir, 2018). Las fibras naturales se dividen en origen vegetal, animal y geológico; las fibras de origen vegetal derivan de las paredes celulares de las semillas, tallos y hojas, entre estas fibras tenemos al algodón, yute, lino, sisal y ramio (Aldalbahi et al., 2021; Sabir, 2018). Las fibras de origen animal, por lo general están compuestas de proteínas como el colágeno, queratina y fibroína, ejemplo de fibras de origen animal son la lana, seda, mohair y alpaca, finalmente, las fibras de origen geológico son obtenidas de fuentes minerales, por ejemplo, los asbestos, entre otros (Aldalbahi et al., 2021).

Las fibras manufacturadas o artificiales se fabrican mediante el procesamiento de polímeros naturales o sintéticos, difieren de las fibras naturales debido a la química del polímero, estas fibras se dividen en regeneradas y sintéticas (Sabir, 2018). Para la fabricación de las fibras regeneradas se usan polímeros de celulosa, aquí se tiene a la fibra de rayón,

acetato, viscosa, liocel, modal, entre otras (Parajuli et al., 2021; Sabir, 2018). Las fibras sintéticas son desarrolladas para mejorar las propiedades de las fibras naturales, entre estas fibras tenemos al acrílico, aramidas, poliéster, poliamidas, etc. (Aldalbahi et al., 2021). La Figura 4 muestra la clasificación general de las fibras textiles.



Fuente: Adaptado de Sabir, 2018

Figura 4. Clasificación de las fibras textiles en naturales y manufactureras.

2.1.3.1. Fibra de algodón

El algodón es una planta de la familia de las malváceas, tribu *Gossypieae* y género *Gossypium*, con tallo de color verde al principio y rojo al momento de florecer, posee hojas alternas de cinco lóbulos y flores amarillas, su fruto es una cápsula que contiene entre 15 a 20 semillas y cada semilla contiene alrededor de 2000–7000 pelos que son las fibras (Iqbal et al., 2021; RAE, 2022a; Wakelyn & French, 2006). La fibra de algodón es una fibra textil vegetal de origen natural, alrededor del 90% de las fibras de algodón son celulosa, la cual es, el polímero más abundante en la naturaleza; la celulosa en las fibras de algodón posee el peso molecular más alto con respecto a todas las fibras vegetales, es altamente cristalina, orientada y fibrilar; además de ello, la longitud y diámetro de fibra de algodón varía de 22 a 50 mm y de 18 a 25 μm , respectivamente (Dochia et al., 2012; Gordon & Hsieh, 2007; Markova, 2019b).

Las principales especies comerciales de fibras de algodón se tienen a *Gossypium aboreum* y *Gossypium herbaceum* que crece en el Medio y Lejano Oriente; *Gossypium hirsutum*

desarrollado en los Estados Unidos a partir del algodón nativo de México y América Central y; *Gossypium barbadense* originario de América del Sur y se cultiva en América y Egipto (Aripov & Ioelovich, 2020; Dochia et al., 2012).

El 80% de la producción mundial de fibra de algodón proviene de la especie *Gossypium hirsutum*, el 10% de *Gossypium barbadense* que son fibras de mayor calidad conocidas como fibras largas o extra largas y; el 10% restante proviene de la fibra corta de especies *Gossypium aboreum* y *Gossypium herbaceum* (Aripov & Ioelovich, 2020; Dochia et al., 2012). El algodón Pima es una fibra extra larga de longitud promedio de 35 mm, se cultiva en los Estados Unidos y América del Sur, tiene muchas de las características de los mejores algodones egipcios, se emplea en la producción de ropa de alta calidad, telas de lujo, hilos especiales para encajes y entre otros (Markova, 2019b; Wakelyn & French, 2006).

2.1.3.2. Estructura de la fibra de algodón

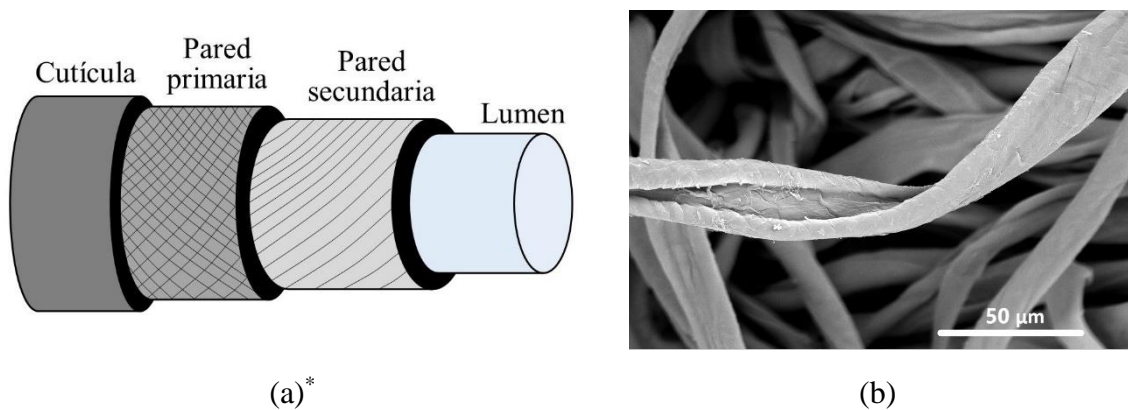
La fibra de algodón tiene una estructura multicapa que consta de una pared primaria, una pared secundaria y un lumen encerrados por una cutícula cerosa (Dochia et al., 2012; Markova, 2019b; L. Wang & Wang, 2009). La fibra de algodón se compone principalmente de α -celulosa en porcentajes de 88 a 96,5% (Degani, 2021; Gordon & Hsieh, 2007; Markova, 2019b).

La pared primaria está en la superficie exterior de la fibra de algodón, contiene bajos niveles de celulosa, polímeros no celulósicos, ceras, pectinas, varias proteínas e iones (Dochia et al., 2012; R. Kozłowski & Mackiewicz-Talarczyk, 2020; L. Wang & Wang, 2009). Entre los componentes no celulósicos, las ceras y pectinas son las responsables de la hidrofobicidad de las fibras de algodón en crudo; las ceras abarcan todos los compuestos lipídicos en la superficie de la fibra de algodón como grasas y resinas (Gordon & Hsieh, 2007; Kothari et al., 2019). La superficie de la pared primaria está desorganizada debido a la presencia de materiales no celulósicos y celulosa amorfa en la que sus fibrillas están dispuestas en un patrón entrecruzado (Dochia et al., 2012; Kothari et al., 2019). La celulosa existente en la pared primaria tiene bajo peso molecular y grado de polimerización entre 2000 a 6000 (Gordon & Hsieh, 2007; Kothari et al., 2019).

La pared secundaria está en el interior de la pared primaria al lado del lumen, está compuesta por celulosa cristalina muy ordenada y tiene una estructura compacta con las fibrillas de celulosa paralelas entre sí (Dochia et al., 2012; Kim et al., 2018; L. Wang &

Wang, 2009). El grado de polimerización de la celulosa en la pared secundaria es de aproximadamente 14000 y con peso molecular uniforme (Gordon & Hsieh, 2007; Kim et al., 2018). La cutícula es la capa más externa de la fibra de algodón, es una película delgada compuesta predominantemente por grasas y ceras (Degani, 2021; L. Wang & Wang, 2009).

Bajo el microscopio, la fibra de algodón tiene torsiones irregulares en forma de cintas retorcidas o giradas, estos giros son denominados convoluciones y la fibra tiene cerca de 60 convoluciones por centímetro; la vista transversal de la fibra tiene una forma parecida a un riñón con un canal central denominado lumen (Dochia et al., 2012; Markova, 2019b). Un esquema de la estructura de la fibra de algodón se muestra en la Figura 5.



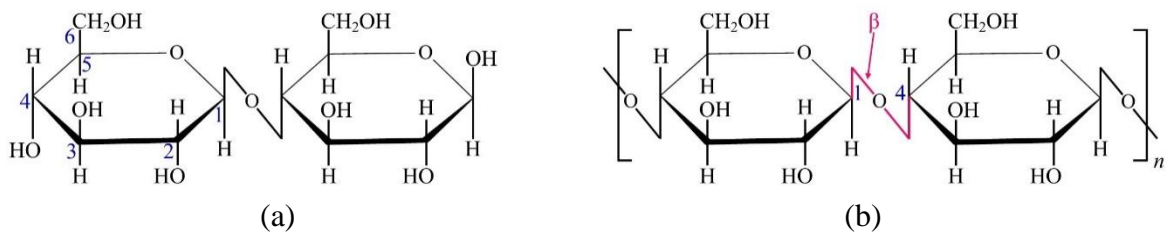
Fuente: * Adaptado de Wang L. & Wang X, 2009

Figura 5. (a) Esquema de la estructura y (b) micrografía electrónica de barrido de una fibra de algodón.

2.1.3.3. Propiedades químicas del algodón

La fibra de algodón está compuesta predominantemente por celulosa y su reactividad química es la misma que el polímero de celulosa (Ruiz-Caldas et al., 2022; Wakelyn & French, 2006). La celulosa es un polisacárido compuesto de unidades de monosacáridos (glucosa) en su estructura molecular básica (Petrucci et al., 2011). La celulosa de algodón es cristalina y orientada, se compone de α -celulosa que se distingue por su estructura molecular larga y rígida; la cadena larga es un polímero lineal con unidades β -D-glucopiranosas o anhidroglucosas (Figura 6(a)), estas unidades mediante una reacción de condensación se unen y forman los enlaces 1,4-glucosídicos (Gordon & Hsieh, 2007; Khalifa & Ladhari, 2019; Kothari et al., 2019). En esta reacción hay eliminación de una molécula de agua formada

entre los grupos hidroxilo unidos al átomo de carbono 1 de una molécula de β -D-glucopiranososa y el átomo de carbono 4 de otra molécula de β -D-glucopiranososa (Britannica, 2019; Wakelyn & French, 2006). Cada β -D-glucopiranososa contiene tres grupos hidroxilo, uno primario en el carbono 6 (C-6) y dos secundarios en los carbonos 2 (C-2) y carbono 3 (C-3), la reactividad química de los grupos hidroxilo es mayor para el C-6 que para C-2 y C-3 (Gordon & Hsieh, 2007; Kumar, Sharma, & Singh, 2017). En la Figura 6(b) se muestra la estructura química del algodón.



Fuente: Adaptado de Kozłowski *et al.* 2020; y Khalifa et al. 2019

Figura 6. (a) Unidades de β -D-glucopiranososa y; (b) estructura molecular de la fibra de algodón.

2.1.3.4. Composición química del algodón

El principal constituyente de la fibra de algodón es la celulosa, también tiene otros constituyentes no celulósicos normalmente presentes en las células vegetales que están en menores porcentajes (R. Kozłowski & Mackiewicz-Talarczyk, 2020). Los constituyentes no celulósicos se ubican en su mayor parte en la cutícula, pared celular primaria y el lumen de la fibra de algodón, los componentes no celulósicos incluyen aminoácidos, proteínas, cera, sustancias pécticas, ácidos orgánicos, azúcares, sales inorgánicas, otros compuestos con contenido de nitrógeno y pequeña cantidad de pigmentos (R. Kozłowski & Mackiewicz-Talarczyk, 2020). La cantidad, tipo y la naturaleza de los constituyentes no celulósicos presentes en la fibra de algodón depende de la fuente de origen, de la madurez de la fibra, variedad de algodón y de las condiciones ambientales como el clima, suelo, entre otros (M. Clark, 2011a; R. Kozłowski & Mackiewicz-Talarczyk, 2020). La composición química de las fibras de algodón se da en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química de la fibra de algodón

Constituyente	Algodón maduro (%)
α -celulosa	88-99,5
Pectina	0,4-1,2
Grasa y cera	0,4-1,2
Compuestos nitrogenados	1,0-1,9
Cenizas (sales inorgánicas)	0,7-1,6
Otros	1,7

Fuente: Adaptado de Clark M., 2011

De los datos presentados en la Tabla 1 se observa que las fibras de algodón tienen una variedad de impurezas que deben eliminarse por medio de procesos textiles adecuados con el objetivo de tener un material textil de algodón, sea hilo o tela, absorbente y libre de impurezas para proseguir con los procesos de teñido o estampado, asimismo, funcionalizarlos con diversos acabados utilizando productos comerciales existentes en el mercado o productos basados en óxidos.

2.1.4. Óxidos empleados en acabados textiles

La palabra óxido se refiere a compuestos formados por metales o no metales con oxígeno, en la actualidad los óxidos metálicos desempeñan un rol importante como componentes en muchas aplicaciones, ello debido a sus propiedades físicas y químicas que dependen del tamaño y la dimensionalidad (Sáenz-Trevizo et al., 2018). En el sector textil, los metales inorgánicos y los óxidos metálicos a nivel nanométrico se utilizan para impartir propiedades multifuncionales a los textiles debido a su gran área y alta energía superficial (Bhandari et al., 2022; Yetisen et al., 2016). Las nanopartículas de metal y óxidos metálicos como Ag, TiO₂, óxido de aluminio (Al₂O₃), ZnO, SiO₂, Cu, CuO, entre otros, son agentes conocidos que producen acabados funcionales a los textiles (Bhandari et al., 2022; Stanić & Tanasković, 2020; Yetisen et al., 2016), por ejemplo, Ag confiere al textil de fibra de lana, algodón y mezcla algodón-poliéster propiedad antimicrobiana (Sunghyun Nam et al., 2021; D. Wang et al., 2022); el TiO₂ aplicado al algodón, lana y poliéster otorga, aparte de la propiedad antimicrobiana, protección UV, hidrofobicidad y resistencia a las arrugas (Rashid, Simončič, & Tomšič, 2021); el Al₂O₃ aplicado al algodón ofrece protección UV y resistencia a las arrugas (Haule & Nambela, 2022; Korkmaz & Alay Aksoy, 2015), el SiO₂ en las fibras de seda y algodón producen textiles antimicrobianos y repelentes al agua (Nozari, Montazer,

& Mahmoudi Rad, 2021); y el Cu y CuO aplicados en materiales textiles confieren propiedades antimicrobianas (Tharwat I. Shaheen, Fouda, & Salem, 2021).

Con esta información se puede ver que hay varios óxidos empleados para dar acabados funcionales a los materiales textiles, entre ellos se tiene a los óxidos de cobre, en la sección de 2.1.4.1 se tratará sobre las características de este óxido.

2.1.4.1. Óxidos de cobre

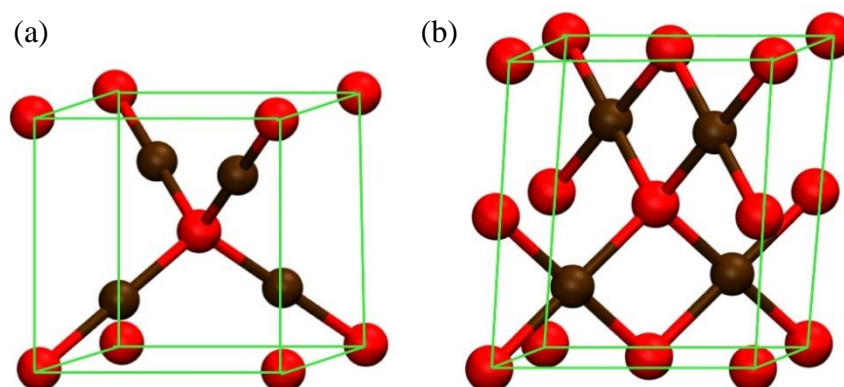
El cobre es un metal que pertenece al grupo 11 de la tabla periódica, es maleable, dúctil y presenta una conductividad térmica y eléctrica excelente, además puede presentar en compuestos coloreados y formar iones complejos (M.-L. Huang et al., 2020; Petrucci et al., 2011). Existen dos series de compuestos de cobre según su estado de valencia: la primera serie son los compuestos cuprosos que provienen del óxido cuproso, Cu₂O (rojo), y tienen el ion Cu⁺¹; la segunda serie son los compuestos cúpricos que provienen del óxido cúprico, CuO (negro) y dan el ion Cu⁺² (M.-L. Huang et al., 2020; Vogel, 1991).

En particular, el CuO u óxido de cobre (II) es un óxido de metal de transición que tiene numerosas aplicaciones en diferentes campos, es abundante, relativamente barato, se mezcla fácilmente con agua y polímeros, y es estable en sus propiedades químicas y físicas (Allaker, 2013; Tiginyanu et al., 2011). Asimismo, el CuO es un semiconductor de tipo p con un valor de banda prohibida de aproximadamente 1,4 eV (Ghijssen et al., 1988; Tiginyanu et al., 2011; J. Zhang et al., 2023). Tiene una estructura cristalina monoclinica, cuyos parámetros de red son $a = 4,6837 \text{ \AA}$, $b = 3,4226 \text{ \AA}$, $c = 5,1288 \text{ \AA}$ y $\beta = 99,54^\circ$ (Åsbrink & Norrby, 1970; Ghijssen et al., 1988; Zhao et al., 2022; Zoolfakar et al., 2014).

En la nanoescala, el CuO se caracteriza por ser estable y tener una vida útil prolongada (Dharmadhikari et al., 2018) y exhibe notables aplicaciones en catálisis (Weldegebrieral, 2020), superconductores de alta temperatura (Patel, Kachhia, & Sharma, 2019), celdas solares (Naveena et al., 2019; Siddiqui et al., 2020), sensores químicos y de gas (D. Li et al., 2019), baterías de iones de litio (J. Li et al., 2020), entre otros. Aparte de eso, también se pueden usar en medicina como tratamientos antibacterianos (Allaker, 2013; Bhandari et al., 2022; Dharmadhikari et al., 2018), antivirales (Minoshima et al., 2016; Tavakoli & Hashemzadeh, 2020) y antifúngicos (Amiri et al., 2017; Devipriya & Roopan, 2017; Mageshwari & Sathyamoorthy, 2013). La síntesis de nanoestructuras de CuO puede ser realizado utilizando métodos químicos como sol-gel, precipitación, microemulsión,

solvotermal, entre otros, y métodos físicos como el molino de bolas mecánico y la ablación con láser (Sibhatu et al., 2022).

El Cu_2O u óxido de cobre (I) es un semiconductor de tipo p con una banda prohibida de 2,17 eV, tiene una estructura cúbica con parámetro de red $a = 4,27 \text{ \AA}$; es una fase térmicamente menos estable que CuO , se puede producir como nanopartículas y tiene una actividad antimicrobiana similar a CuO frente a un rango amplio de microorganismos (Allaker, 2013; Dai et al., 2023; Gattinoni & Michaelides, 2015; Ghijsen et al., 1988). La Figura 7 exhibe las estructuras cristalinas del Cu_2O y CuO .



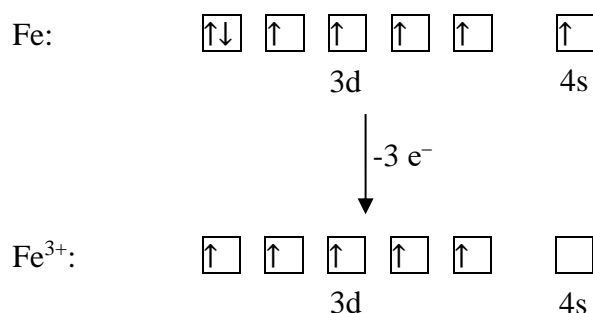
Fuente: Gattinoni, C. y Michaelides, A., 2015

Figura 7. Estructura cristalina: (a) cúbica del Cu_2O y (b) monoclinica del CuO . Las esferas rojas representan oxígeno, las marrones cobre y las líneas verdes la celda unitaria.

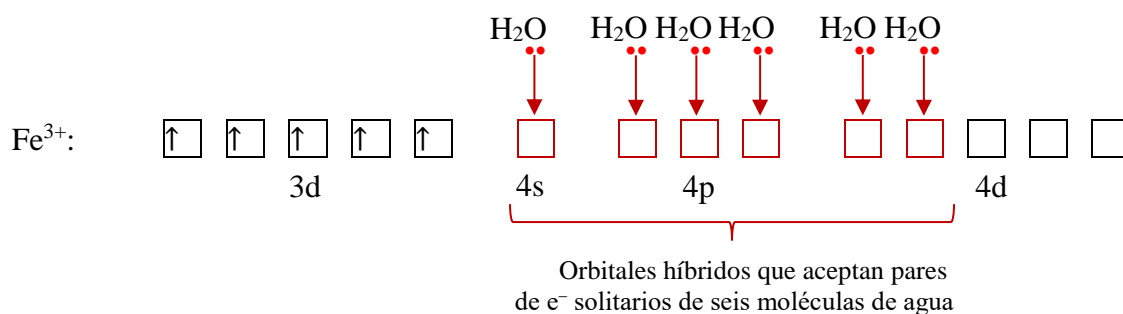
2.1.4.2. Formación de complejos metálicos

Un complejo metálico es una estructura molecular en la que un átomo o ion metálico central está rodeado por un conjunto de ligandos (iones o moléculas); un complejo se define como la combinación de un ácido de Lewis (receptores de electrones), que es el átomo metálico, con un número determinado de bases de Lewis (dadores de electrones), que son los ligandos (Schaller, 2022; Shriver, Atkins, & Langford, 2007). Entre los ligandos simples se tiene al agua, amoníaco e iones de cloruro, estos poseen pares de electrones solitarios activos en el nivel de energía exterior que se utilizan para formar enlaces coordinados con el ion metálico (Chemguide, 2021; Schaller, 2022). El enlace coordinado es un enlace covalente especial, en el cual, en lugar de aportar un electrón cada átomo del enlace, los dos electrones son aportados por el mismo átomo; este tipo de enlace se conoce como enlace covalente coordinado o dativo (Bhagavan & Ha, 2015; Petrucci et al., 2011).

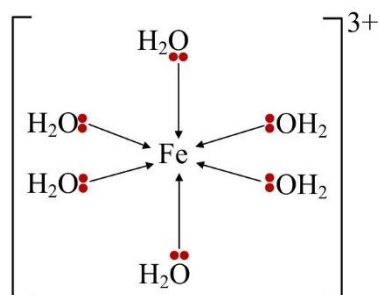
Por ejemplo, el detalle de la formación del complejo iónico de hierro $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ es el siguiente, el hierro (Fe) con número atómico 26, antes de estar en contacto con moléculas de agua tiene una estructura electrónica de $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2$; al formar el ion Fe^{3+} pierde electrones del tercer y cuarto nivel, la nueva estructura electrónica sería $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5$, analizando esta pérdida como electrones en caja se tendría (Chemguide, 2021; Schaller, 2022):



La pérdida del electrón en 4s significa que todos los orbitales del 4to nivel están vacíos, entonces el hierro usará 6 orbitales de los niveles 4s, 4p y 4d para aceptar pares de electrones solitarios de las moléculas de agua, pero antes que se utilicen los orbitales se reorganizan (hibridan) para producir seis orbitales con la misma energía, tal como sigue (Chemguide, 2021; Schaller, 2022):

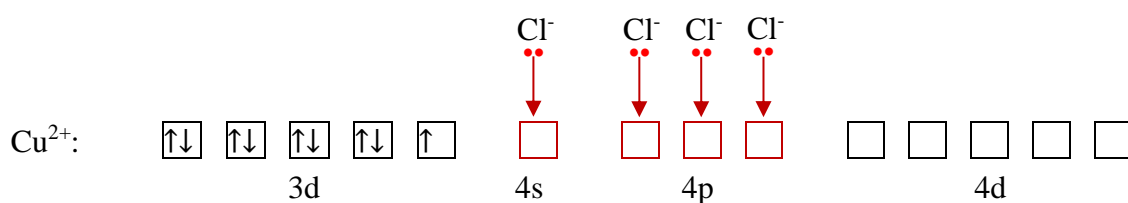


Por lo tanto, un par de electrones solitarios del agua estará con el hierro y el par restante apuntará al lado opuesto del metal, el ion resultante se verá del siguiente modo (Brown et al., 2022; Chemguide, 2021):

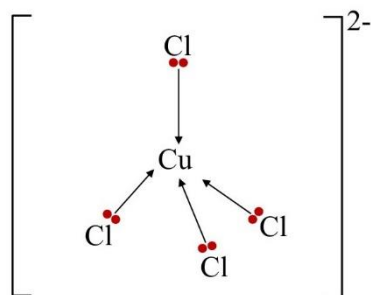


La cantidad de seis moléculas de agua es el número máximo posible de moléculas en contacto con un ion metálico, al ser el máximo de enlaces se libera la mayor cantidad de energía, en consecuencia, se vuelve energéticamente más estable (Brown et al., 2022; Chemguide, 2021).

Otro ejemplo es la formación del complejo iónico con carga negativa $[\text{CuCl}_4]^{2-}$. La distribución electrónica del Cu, con número atómico 29, es $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$; cuando se forma el ion Cu^{2+} hay pérdida de electrones en los orbitales 4s y 3d, la estructura electrónica quedaría $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^9$, para enlazar y aceptar pares de electrones solitarios de los 4 iones de cloro, se utilizan los orbitales vacíos del 4to nivel (4s y 4d), en este caso, sólo acepta 4 iones de cloro en lugar de 6 debido a que el ion cloruro por ser más grande que las moléculas de agua no se pueden acomodar alrededor del ion central, exactamente como se muestra a continuación (Brown et al., 2022; Chemguide, 2021):



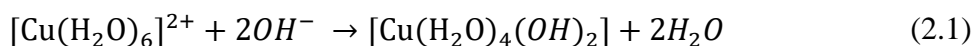
El ion tendrá en total 2 cargas negativas como resultado de la combinación de las 2 cargas positivas del ion de cobre con 4 cargas negativas del ion cloruro, el complejo ion resultante es (Brown et al., 2022; Chemguide, 2021):



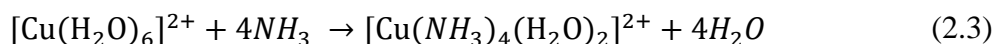
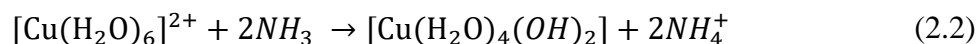
El complejo $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ es el resultado de la disolución en agua de las sales cúpricas, su mecanismo de formación es similar al complejo iónico de hierro $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$. En el ion $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ hay dos moléculas de agua están más lejos del átomo metálico que las otras cuatro. Con la adición de ligantes resulta la formación de complejos gracias al desplazamiento sucesivo de las moléculas de agua. Se tienen gran número de complejos cúpricos formados por ligantes que coordinan a través de oxígeno, por ejemplo, en la adición de tartrato a soluciones cúpricas se forman complejos polinucleares que se evidencian con una coloración azul resultante de la solución (Brown et al., 2022; Cotton & Wilkinson, 1972).

2.1.4.3. Reacción del ion de cobre (II) en solución

La mayoría de las sales de cobre se disuelven en agua y dan lugar a la formación del típico ion azul hexaaquocobre (II) $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$, en la reacción química de este ion con hidróxido de sodio, los iones hidróxido remueven iones hidrógeno de dos moléculas de agua produciendo un complejo neutro y agua, tal como es presentado en la ecuación 2.1 (J. Clark, 2020; Chemguide, 2015):



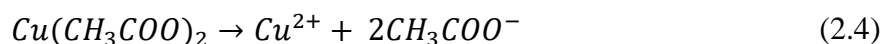
En la reacción con una pequeña cantidad de amoníaco, dos iones de hidrógeno se extraen del ion hexaaquocobre (II) y se origina un complejo neutro (ecuación 2.2); en el caso de tener amoníaco en exceso, cuatro moléculas de agua son reemplazadas y se da el ion tetraamminodiaquocobre(II), tal como se ve en la ecuación 2.3 (J. Clark, 2020; Chemguide, 2015).



2.1.4.4. Mecanismo de reacción del óxido de cobre

El CuO puede ser sintetizado a partir de diferentes sales precursoras como acetato de cobre ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$), nitrato de cobre ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$), sulfato de cobre (CuSO_4) o cloruro de cobre (CuCl_2). Weldegebrical (2020), biosintetizó nanopartículas de CuO añadiendo a temperatura ambiente 100 mL de extracto de hojas de *Verbascum thapsus* en 300 mL de 0,1 M de $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, luego la temperatura fue incrementada a 100°C y el sistema se mantuvo bajo agitación por 2 h, finalizado este tiempo, la mezcla fue centrifugada, lavada varias veces con agua doblemente destilada y etanol. El producto obtenido fue secado a 70°C por 12 h y luego calcinado a 400°C por 6 h. Las nanopartículas de CuO sintetizadas tenían una morfología esférica y estructura cristalina monoclinica, asimismo, fotodegradaron el azul de metileno e inhibieron el crecimiento de las bacterias *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli* (Weldegebrical, 2020). Poonguzhali et al. (2022), en su investigación sintetizaron nanopartículas de CuO bajo el método de combustión asistido por ácido cítrico natural (jugo de limón recién extraído). Para la síntesis se mezclaron 50 mL de ácido cítrico natural con 50 mL de solución de $\text{Cu}(\text{NO}_3) \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. La mezcla fue agitada por 1 h y luego secada a 100°C , posteriormente, el polvo obtenido fue calcinado a 350°C . Las nanopartículas de CuO obtenidas presentaron formas esféricas y, según los patrones de difracción de rayos X, el tamaño promedio de los cristalitas estaba en el rango de 12 a 25 nm (Vandamar Poonguzhali et al., 2022).

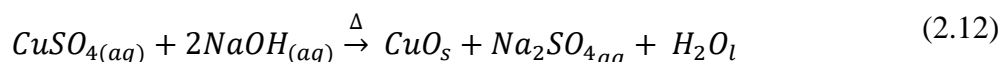
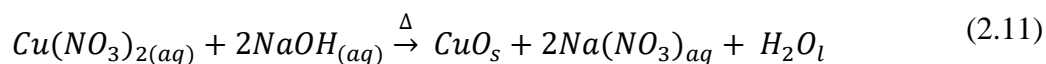
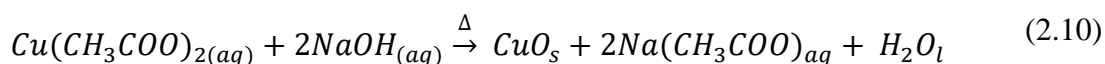
Para la síntesis de CuO partiendo de las sales de $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ y CuSO_4 e hidróxido de sodio (NaOH), investigadores proponen que iones Cu^{2+} reaccionan con iones OH^- ; para ello, primero se produce la ionización de las sales de cobre y el álcali en medio acuoso, la ionización se presenta en las ecuaciones 2.4 al 2.7 (Botsa, Dharmasoth, & Basavaiah, 2018; Petrucci et al., 2011; Vogel, 1991):



Los iones metálicos en soluciones alcalinas se rodean de iones OH^- para formar unidades de hidróxidos metálicos $[\text{M}(\text{OH})_x]$ (Botsa, Dharmasoth, & Basavaiah, 2018; Escobedo-Morales et al., 2011), por consiguiente, la reacción química entre los iones Cu^{2+} y los iones OH^- producen un precipitado de color azul que corresponde al hidróxido cúprico ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) (ecuación 2.8) y por calentamiento el $\text{Cu}(\text{OH})_2$ se deshidrata y se produce CuO (ecuación 2.9) (Cotton & Wilkinson, 1972; Davarpanah et al., 2015).



Las ecuaciones estequiométricas resultantes para las sales de acetato, nitrato y sulfato de cobre serían (Botsa, Dharmasoth, & Basavaiah, 2018; Vogel, 1991):



Con la finalidad de estudiar y conocer las propiedades morfológicas, superficiales, composición química, etc., de materiales textiles funcionalizados con metales, óxidos de cobre u otros tipos de óxidos, generalmente se emplean técnicas instrumentales de caracterización de materiales, algunas de ellas serán descritas en la siguiente sección 2.1.5.

2.1.5. Técnicas de caracterización

Las técnicas de caracterización de espectrometría masas por plasma acoplado inductivamente, espectroscopía de fotoelectrones de rayos X, espectrometría de masas de iones secundarios, dispersión de rayos X de ángulo amplio y microscopía electrónica de barrido están descritas en las secciones del 2.1.5.1 al 2.1.5.4.

2.1.5.1. Espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)

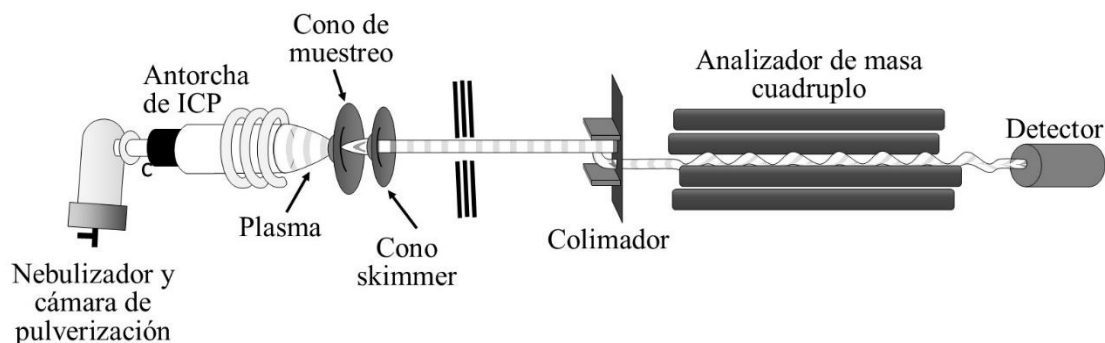
La espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS por sus siglas en inglés de *Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry*) es una técnica analítica

instrumental basada en el uso de una fuente de ionización de alta temperatura (ICP) acoplada a un espectrómetro de masas (MS) (Abou-Shakra, 2003; Al-Hakkani, 2019). En esta técnica el plasma es generado sometiendo un flujo de gas de argón (Ar), que es la fuente de iones estándar en los instrumentos ICP-MS comerciales, a un campo electromagnético de radiofrecuencia producido por una bobina enrollada alrededor del extremo de una antorcha de cuarzo; el inicio del plasma se produce por medio de una chispa de alto voltaje que genera iones y electrones que chocan con los átomos de Ar, provocando la ionización e ignición del plasma; el movimiento de iones y electrones inducido de forma continua por el campo magnético, provoca que los átomos de Ar colisionen, es decir, se da el calentamiento óhmico del gas hasta una temperatura de 10 000 K (Al-Hakkani, 2019; Cubadda, 2007; Nageswaran, Choudhary, & Jagannathan, 2017).

La antorcha de cuarzo estándar suele ser del tipo Fassel, el cual consta de tres tubos de cuarzo concéntricos; el tubo exterior es para el gas del plasma, en el tubo intermedio circula un gas auxiliar que posiciona el plasma dentro de la antorcha y; el tubo interior llamado también tubo inyector que se emplea para el gas portador y tiene la función de transportar la muestra e introducirla en el centro del plasma (Al-Hakkani, 2019; Cubadda, 2007; Nageswaran, Choudhary, & Jagannathan, 2017). Cuando una muestra es líquida se rocía en el plasma en forma de aerosol húmedo por medio de un nebulizador y una cámara de rociado, el aerosol producido penetra en el plasma y se origina una secuencia de pasos de desolvatación, vaporización, atomización y ionización en unos pocos milisegundos (Al-Hakkani, 2019; Cubadda, 2007; Faraldos & Goberna, 2011; Nageswaran, Choudhary, & Jagannathan, 2017).

El ICP funciona a presión atmosférica mientras que el espectrómetro de masas requiere un vacío superior a 10^{-6} torr; los iones producidos en el plasma de argón a presión atmosférica se deben extraer del canal central del plasma mediante un sistema de vacío, ello se logra a través de dos placas de metal, conocidos como conos de interfase que suelen ser de níquel, platino o cobre, el primer cono se denomina de muestreo y el segundo *skimmer*, estos conos transfieren los iones cargados positivamente al espectrómetro de masas (Cubadda, 2007; Nageswaran, Choudhary, & Jagannathan, 2017). Posteriormente, los iones del analito son separados de otros iones y, cuando llegan al detector del espectrómetro se origina pulsos eléctricos cuya magnitud corresponderán al número de iones de analito presentes en la muestra, por otro lado, los analizadores de masa varían en el tipo de espectrómetro de masas que se conecta a la fuente de iones ICP, entre ellos tenemos al

analizador de masa de cuadrupolo, sector magnético, tiempo de vuelo y analizador de masas de trampa de iones (Al-Hakkani, 2019; Cubadda, 2007; Nageswaran, Choudhary, & Jagannathan, 2017). En la Figura 8 se muestra los componentes de un ICP-MS de cuadrupolo.



Fuente: Adaptado de Nageswaran, 2017

Figura 8. Esquema de un espectrómetro de masas por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS).

2.1.5.2. Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS)

El efecto fotoeléctrico descubierto el siglo pasado es la base de la espectroscopía de fotoelectrones de rayos X que se denomina XPS por sus siglas en inglés de *X-Ray Photoelectron Spectroscopy* (Atkins, 2006; Faraldos & Goberna, 2011; Foelske-Schmitz, 2018). Esta espectroscopía se caracteriza por tener una elevada sensibilidad superficial, puede ser aplicado en campos industriales como: la microelectrónica, corrosión, recubrimientos ópticos, almacenamiento magnético de datos, etc., además puede ser aplicado en los campos de estudio de semiconductores, catálisis, polímeros, aleaciones y otros (Faraldos & Goberna, 2011; Foelske-Schmitz, 2018).

Asimismo, esta técnica de superficie permite: identificar los elementos presentes en la muestra a analizar (con excepción del hidrógeno y helio); determinar de forma semicuantitativa la composición superficial elemental; analizar la muestra hasta una profundidad de 10 nm; realizar estudios de heterogeneidad en la superficie del material; informar sobre el entorno molecular; identificar materiales empleando espectros de la banda de valencia y de identificación de los orbitales de enlace; entre otras informaciones (Faraldos & Goberna, 2011; H. Huang et al., 2022).

Dentro de los fundamentos de la técnica se tienen que esta espectroscopía se basa en la interacción entre los fotones y la materia. Cuando un fotón interactúa con un átomo, tres diferentes fenómenos se pueden presentar: (a) el fotón pase sin ninguna interacción, (b) el fotón interactúe con una pérdida de energía parcial, esta posibilidad es conocido como efecto Compton, y (c) el fotón interactúe con un electrón de un orbital atómico produciéndose una transferencia total de la energía del fotón al electrón, originando la emisión del fotoelectrón del átomo, este último comportamiento describe el proceso de fotoemisión, por tanto, la fotoemisión consiste en irradiar una muestra con fotones de energía superior a la energía de enlace de los electrones en los átomos, de manera que estos electrones son expulsados de la muestra (Faraldos & Goberna, 2011; Foelske-Schmitz, 2018).

La incidencia de un fotón de rayos X de energía $h\nu$ (donde h es la constante de Planck y ν es la frecuencia de la radiación) sobre átomos localizados en la superficie de una muestra, produce la emisión de fotoelectrones, y la energía de estos fotoelectrones emitidos es analizada con un espectrómetro y cuyos datos obtenidos se representan en una gráfica o espectro de intensidad (cuentas o cuentas/s) versus energía del electrón en electronvoltio (eV) (Watts & Wolstenholme, 2020). La energía de enlace (E_B) de los fotoelectrones se presenta en la ecuación 2.13:

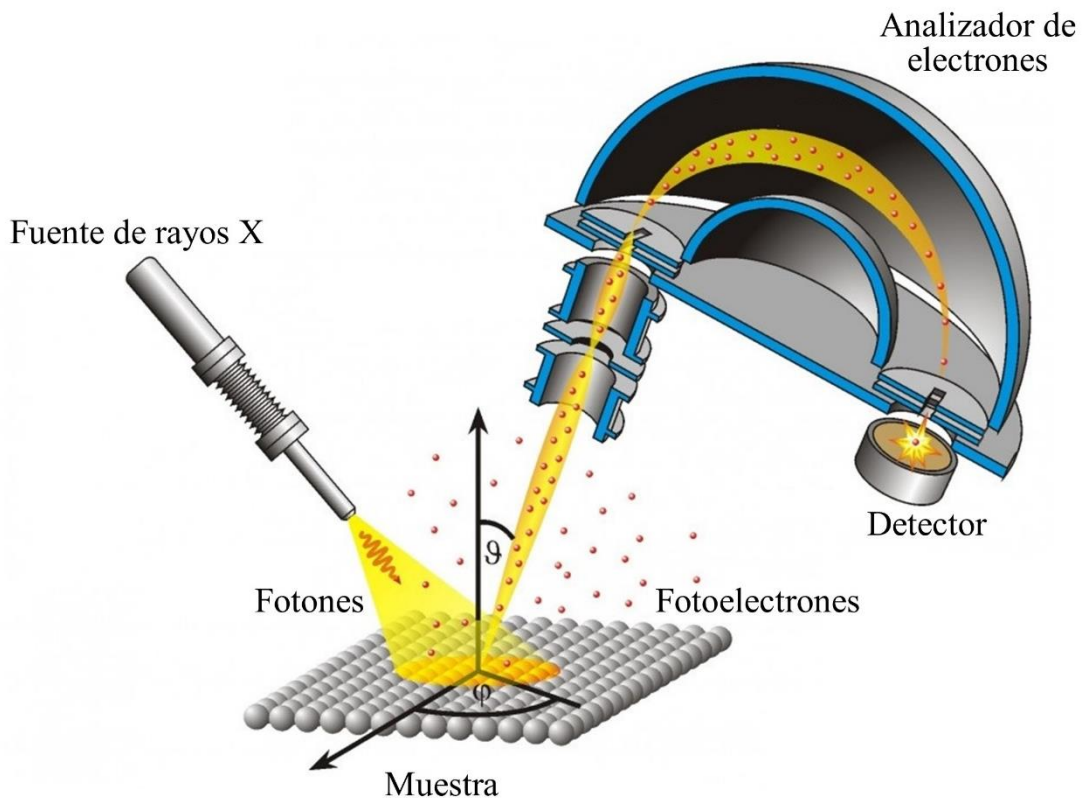
$$E_B = h\nu - E_K - \phi \quad (2.13)$$

Donde $h\nu$ es la energía del fotón, E_K es la energía cinética del electrón y ϕ la función de trabajo del espectrómetro (Watts & Wolstenholme, 2020). La energía cinética es una cantidad experimental medida por el espectrómetro y depende de la energía de la fuente de rayos X utilizada, de la energía de enlace y de la función trabajo del espectrómetro que puede ser aproximado a una constante en cada equipo y cuyo valor debe ser verificado regularmente (Faraldos & Goberna, 2011; Watts & Wolstenholme, 2020).

El acoplamiento espín-orbita describe una interacción entre el momento magnético ligado al espín de los electrones y el movimiento de los electrones en el orbital alrededor del núcleo; cada orbital posee un valor de momento angular (l) definido y el electrón un espín (s), debido al acoplamiento espín-orbita se produce la suma vectorial $l \pm s$ que da lugar al surgimiento de dos niveles energéticos degenerados, con excepción de los que no poseen momento angular como es el caso del orbital s (Faraldos & Goberna, 2011; Foelske-Schmitz, 2018; Varshalovich, Moskalev, & Khersonskii, 1988).

En los espectros XPS se podrá observar dos picos de fotoelectrones provenientes de niveles energéticos degenerados y cada nivel estará indicado por la intensidad relativa: $p_{3/2}:p_{1/2}$, 2:1; $d_{5/2}:d_{3/2}$, 3:2; $f_{7/2}:f_{5/2}$, 4:3 (Faraldos & Goberna, 2011; Watts & Wolstenholme, 2020). Asimismo, los espectros XPS están formados por una serie de picos sobre una línea base y cada elemento químico tiene un conjunto de picos con energías características que permiten identificarlo fácilmente, además el pico fotoelectrónico más intenso es generalmente utilizado para realizar los análisis cuantitativos y de estado químico (Foelske-Schmitz, 2018; Martínez de Yuso, 2015).

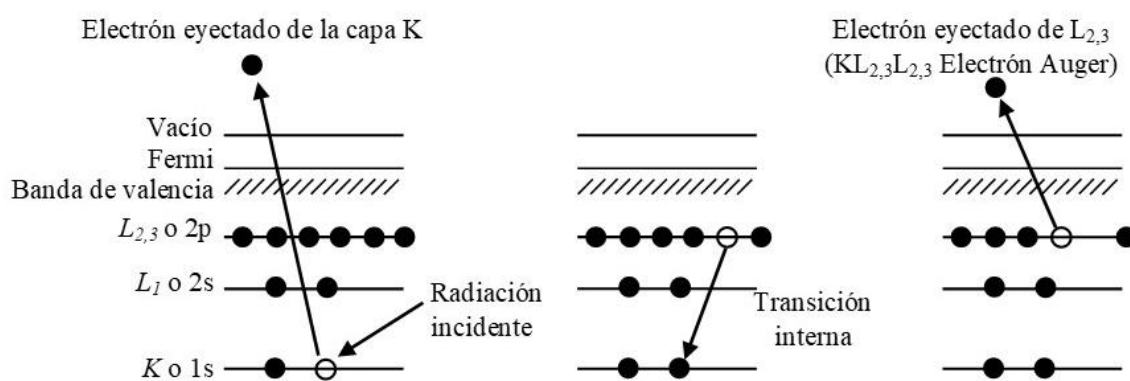
Un espectrómetro fotoeléctrico consta de partes importantes como la cámara de análisis, sistema de vacío, fuente de rayos X, sistema de análisis de electrones y accesorios como lentes, manipulador de muestras, cámara de pretratamiento, detector, otros (AG Jacobs - Universität des Saarlandes, 2022; Faraldos & Goberna, 2011). Un esquema de un espectrofotómetro de fotoelectrones de rayos X se muestra en la Figura 9.



Fuente: Adaptado de AG Jacobs, 2022

Figura 9. Representación esquemática de un espectrofotómetro de fotoelectrones de rayos X.

Por otro lado, un esquema del proceso de emisión de fotoelectrones y electrones Auger se ilustra en la Figura 10, allí se muestra el proceso de fotoemisión donde un electrón de la capa K es eyectado del átomo (un fotoelectrón del orbital 1s), en consecuencia, cuando se emite un fotoelectrón, un electrón de un nivel energético superior cae a la vacante originada por la emisión del electrón K en la estructura electrónica, esto produce un exceso de energía que provoca la emisión de un segundo electrón o electrón Auger, estos electrones Auger pueden figurar en algunos espectros fotoeléctricos como picos representados con subíndices de letras (Faraldos & Goberna, 2011; Unger, Wirth, & Hodoroaba, 2020; Watts & Wolstenholme, 2003).



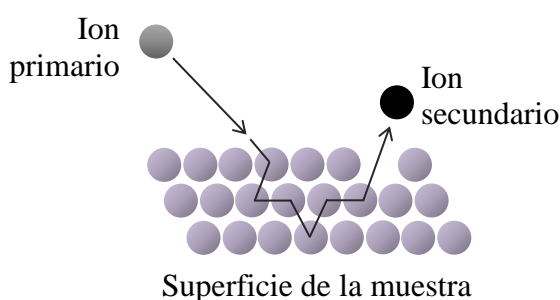
Fuente: Adaptado de Watts, 2003 y Unger, Wirth, & Hodoroaba, 2020

Figura 10. Esquema del proceso de emisión de fotoelectrones y electrones Auger.

2.1.5.3. Espectrometría de masas de iones secundarios en el tiempo de vuelo (TOF-SIMS)

La espectrometría de masas de iones secundarios en el tiempo de vuelo (TOF-SIMS, por sus siglas en inglés de *Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry*) es una técnica de espectrometría de masas muy sensible, utilizada para analizar la química de los materiales y proporcionar información específica de su superficie (Kohli, 2012; Schaepe et al., 2020). La espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS - *Secondary Ion Mass Spectrometry*), es una técnica basada en la detección y análisis de iones; mide la relación masa/carga (m/z) de los iones secundarios generados por el bombardeo de una superficie objetivo con un haz de iones primario (Crowley, 2020; Welker, 2012). El haz de iones primario se debe colimar y acelerar a una energía apropiadamente alta, de modo que, cuando impacte con la superficie

objetivo, provoque colisiones elásticas e inelásticas que transfieran parte de la energía del haz de iones primario a las partículas dentro y alrededor de la superficie; este proceso puede conducir a que un átomo o grupo de átomos reciban energía suficiente en una dirección adecuada que les permita superar las fuerzas de unión de la superficie y luego puedan ser expulsados del objetivo, es decir, se produzca la eyección de iones secundarios, y estos iones emitidos tienen cargas positivas, negativas y neutras (Fearn, 2015; Schaepe et al., 2020). La Figura 11 presenta de forma esquemática la colisión de un ion primario con la superficie de una muestra que conduce a la formación de un ion secundario.



Fuente: Adaptado de Fearn, S., 2015

Figura 11. Esquema de formación de un ion secundario.

Entre los componentes importantes de un espectrómetro de masas está el analizador, el cual es un dispositivo que separa los iones secundarios formados en función de su relación masa/carga (Faraldos & Goberna, 2011; Schaepe et al., 2020). Existen diferentes analizadores entre ellos tenemos a los magnéticos, cuadrupolares, tiempo de vuelo, de trampa iónica cuadrupolar y analizadores de resonancia ciclotrónica de iones por transformada de Fourier; cada uno de estos analizadores emplea distintos principios físicos para separar los iones y, como consecuencia, todos tienen diferentes límites superiores de masa, resoluciones y precisión de masa. El sistema de tiempo de vuelo (*Time-of-Flight*, TOF) es el más común y simple de los analizadores (Fearn, 2015; Schaepe et al., 2020).

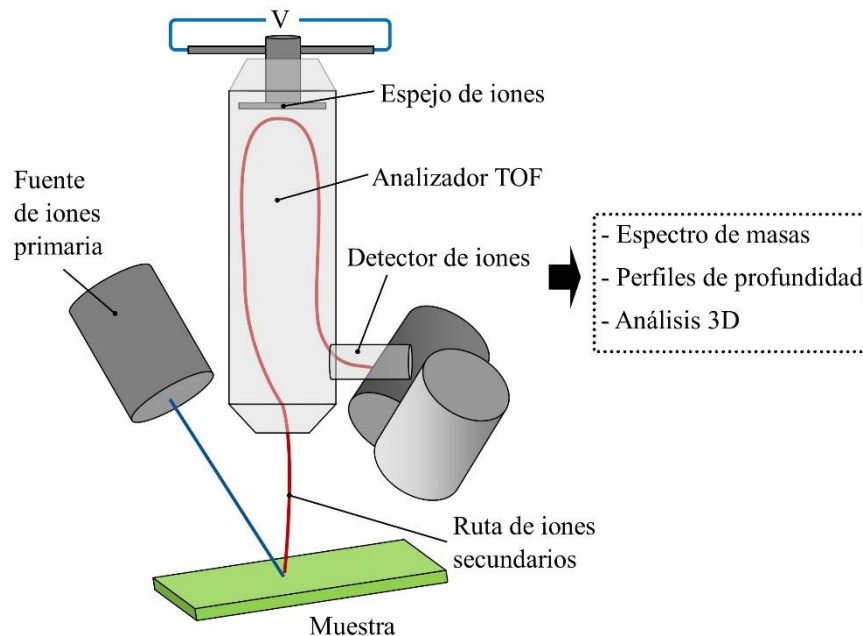
Cuando son formados los iones secundarios desde la superficie de la muestra, estos iones son sometidos a un voltaje fijo V de signo contrario que los acelera con una energía cinética dada en la ecuación 2.14 (Fearn, 2015; Schaepe et al., 2020):

$$zV = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.14)$$

La velocidad v de los iones ahora depende inversamente de la raíz cuadrada de su masa m . Después de la aceleración de los iones, estos se desplazan por un tubo de vuelo que está libre de campo, luego la separación de masas (m/z) se obtiene de acuerdo con la ecuación 2.15 (Fearn, 2015):

$$\frac{m}{z} = \frac{2Vt^2}{L^2} \quad (2.15)$$

Siendo V el potencial de aceleración, L longitud del tubo de vuelo y t el tiempo que tardan los iones en viajar por el tubo de vuelo y llegar al detector, es decir, el tiempo de vuelo de los iones secundarios, de esta forma los iones más ligeros viajarán más rápido y llegarán al detector antes que los iones pesados que se moverán más lentamente y llegarán a intervalos posteriores; a partir de la ecuación 2.15, los tiempos de llegada de los iones al detector dependerán de la relación m/z respectiva generando un espectro de masas de cada pulso del haz de iones (Fearn, 2015; Schaepe et al., 2020). La Figura 12 muestra un esquema de los componentes instrumentales de un espectrómetro de masas iónicas secundarias en el tiempo de vuelo.



Fuente: Adaptado de Fearn, S., 2015

Figura 12. Componentes principales de un espectrómetro TOF-SIMS

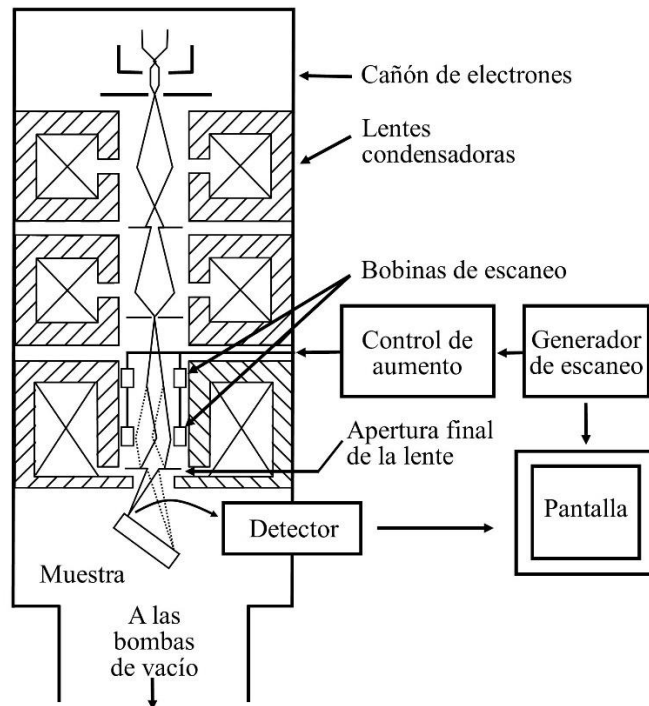
2.1.5.4. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

El microscopio electrónico de barrido (MEB) es un tipo de microscopio electrónico que genera imágenes de una muestra con resolución nanométrica al escanearla con un haz de electrones en lugar de la luz como es el caso de la microscopía óptica, el uso de electrones permite ampliar la resolución de la imagen llegando hasta una escala atómica (Raghavendra & Pullaiah, 2018; Toma, 2016). En MEB, un haz de electrones con baja energía pasa a través de lentes condensadoras y lentes de objetivo y escanea la superficie de la muestra por las bobinas de barrido, se producen varias interacciones cuando el haz alcanza y entra en contacto con el material, lo que conduce a la emisión de fotones y electrones de la superficie de la muestra, los cuales son contados por dispositivos detectores (Goldberg & Allen, 2023; Omid et al., 2017).

Los lentes de MEB se usan para enfocar y ampliar el haz de electrones sobre la superficie de la muestra, las ventajas del microscopio de barrido son su rango de ampliación y profundidad de campo de la imagen; esta profundidad de campo permite enfocar a la vez superficies de la muestra que se encuentran a diferentes alturas, y que dependen de la divergencia del haz de electrones que viene definido por la distancia entre la muestra y el diámetro de apertura del lente objetivo (Faraldos & Goberna, 2011; Goldberg & Allen, 2023). La intensidad de haz de electrones del monitor se modula con la señal proveniente del detector de electrones secundarios o retrodispersados, este haz de electrones es barrido sobre la pantalla del monitor a la vez que se produce el barrido de haz de electrones sobre la muestra, lográndose formar la imagen (Faraldos & Goberna, 2011; Goldberg & Allen, 2023).

Uno de los fenómenos importantes causados por el impacto de los electrones en la muestra es la emisión de electrones secundarios de baja energía (SE, por sus siglas en inglés), seguido de la emisión de electrones retrodispersados (BSE, por sus siglas en inglés) con energías mayores, otro es cuando el haz de electrones interacciona inelásticamente con la muestra y se emite fotones de rayos X con energía y longitud de onda característicos de los elementos que conforman la muestra analizada (Faraldos & Goberna, 2011; Goldberg & Allen, 2023).

La Figura 13 muestra un microscopio electrónico de barrido típico con sus principales componentes que son la columna de electrones, detectores, sistema de vacío y controles electrónicos (Yurdakal et al., 2019).



Fuente: Adaptado de Yurdakal *et al.*, 2019

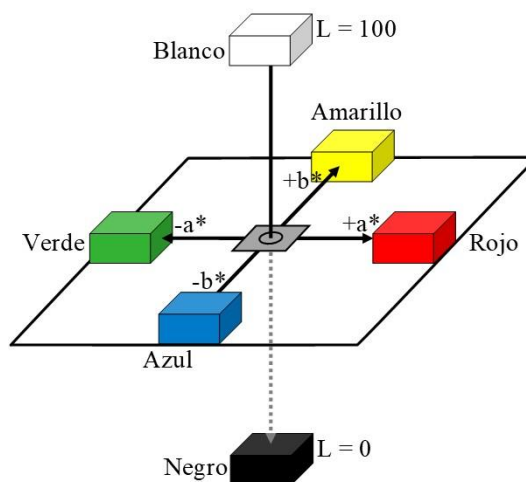
Figura 13. Esquema de un microscopio electrónico de barrido.

2.1.6. Colorimetría

La colorimetría es la ciencia de la medición del color, reemplaza las respuestas subjetivas de los colores con un sistema numérico objetivo; para percibir un color de un objeto es necesario tres factores: una fuente de luz, un objeto coloreado y un observador (Gilchrist & Nobbs, 2017; Lee et al., 2020). La colorimetría ha definido tres atributos para especificar el color que son el tono (rojo, amarillo, azul, etc.), brillo o luminosidad (claridad u oscuridad) y saturación o intensidad (Jayas et al., 2008; Lee et al., 2020). La Comisión Internacional de la Iluminación (CIE, por sus siglas en francés), desarrolló espacios de color. El espacio CIE $L^*a^*b^*$ se basa en la teoría opuesta de la visión del color, para describir el tono de un material hay sólo cuatro únicas palabras, rojo, verde, amarillo y azul, son únicas porque no se pueden describir sin usar su propio nombre de color, no obstante, cualquier otro tono se puede describir usando una o más palabras de ese mismo conjunto de cuatro (Gilchrist & Nobbs, 2017; Lee et al., 2020). Junto con el blanco y negro, se forma un grupo de seis propiedades de color que se pueden agrupar en tres pares opuestos, blanco-negro, rojo-verde y amarillo-azul (Gilchrist & Nobbs, 2017).

El CIE $L^*a^*b^*$ es un modelo cromático donde se representan los atributos del color de forma tridimensional, en un plano las cantidades de enrojecimiento o verdor de una sensación de color puede ser representado por la distancia a lo largo de un solo eje, con el rojo en un extremo y verde en el otro extremo, igualmente, el amarillo y azul son extremos opuestos de un segundo eje, el cual que podría colocar perpendicular a la dirección del eje rojo-verde, y en un tercer eje sería el blanco-negro que estaría en un plano normal a los otros dos (Gilchrist & Nobbs, 2017; Lee et al., 2020). El valor L^* es el eje vertical que representa la luminosidad, sus valores están comprendidos desde el 100 (blanco perfecto) hasta el 0 (negro perfecto); a^* es el eje de la coordenada rojo-verde ($+a^*$ = rojo, $-a^*$ = verde) y b^* es eje de la coordenada amarillo-azul ($+b^*$ = amarillo, $-b^*$ = azul) (Gilchrist & Nobbs, 2017).

La medición del color se puede realizar usando un espectrofotómetro o un colorímetro. El espectrofotómetro es el instrumento más preciso para la medición del color, en este equipo se mide la luz transmitida o reflejada por el material a medir para cada longitud de onda en el rango visible (400-700 nm), el espectrofotómetro consiste de una fuente de energía radiante, un mono o policromador y un sistema detector (Lee et al., 2020; Salem, 2010). La Figura 14 muestra el espacio CIE $L^*a^*b^*$ (Afonso et al., 2017).



Fuente: Adaptado de Afonso *et al.*, 2017

Figura 14. Espacio de color CIE $L^*a^*b^*$.

2.2. Marco conceptual

- Interacción: Acción que se ejerce de forma recíproca entre dos o más personas, objetos, agentes, funciones y fuerzas (RAE, 2022e).
- Físico-química: Es un rama de la ciencia que estudia la interrelación entre las propiedades físicas y químicas de una sustancia (RAE, 2022d).
- Celulosa: Polisacárido que forma la pared de las células vegetales, es el componente esencial del papel (RAE, 2022c).
- Algodón: Planta de la familia de las malváceas, al principio con tallos verdes, al tiempo de florecer son rojos, con hojas alternas casi acorazonadas y de cinco lóbulos, flores amarillas con manchas encarnadas, y cuyo fruto es una cápsula que contiene de 15 a 20 semillas, envueltas en una borra muy larga y blanca, que se desenrolla y sale al abrirse la cápsula (RAE, 2022a).
- Antimicrobiano: Que combate los microbios o evita su aparición (RAE, 2022b).
- Tejido: Material hecho tejiendo. Textura de una tela (RAE, 2022f).
- Textiles funcionales: Son materiales textiles con funcionalidades excepcionales (Mangala & Bapan, 2019).

CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En esta sesión son descritos los materiales y métodos que se utilizaron en el desarrollo de la presente investigación.

3.1. Materiales

Los productos químicos utilizados en la parte experimental fueron sales precursoras de acetato de cobre monohidratado ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (Merck, 99%), nitrato de cobre trihidratado ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (Merck, 99%), sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (J.A. Elmer, 99%) e hidróxido de sodio (NaOH) (Sharlau 98,5%). El material empleado para la obtención de textiles antimicrobianos fue un tejido plano preparado para teñir de composición 100% algodón proveído por la fábrica local Tejidos San Jacinto S.A. Otros insumos químicos y equipos que fueron usados en este estudio se mencionarán en la descripción del trabajo.

3.2. Funcionalización del textil con CuO_x

El método utilizado para la funcionalización del textil con CuO_x fue según lo descrito en la previa publicación por nuestro grupo de investigación con algunas modificaciones (Luz E. Román et al., 2020). Se utilizó muestras de tejido plano, preparado para teñir, con gramaje de $296,41 \text{ g/m}^2$. Para la funcionalización *in situ* de los tejidos fue empleado 2% s.m.t. (sobre la masa del textil) de sales precursoras de acetato, nitrato y sulfato de cobre; y 0,5 g/L de hidróxido de sodio. La funcionalización se realizó por el método de teñido de agotamiento haciendo uso del equipo textil de alta temperatura (HT – *High Temperature*) de la marca Rapid, modelo Eco Dyer-24, tal como se representa en la Figura 15. Fueron preparados baños de agotamiento con una relación de baño de 1:10 (peso de tejido: volumen del baño) a partir de las sales de cobre. Muestras de 5,0 g de tejido plano fueron sumergidas en cada frasco de acero que contenían 50 mL del baño de agotamiento previamente preparado (Etapa A-Figura 15). Los frascos fueron cerrados e introducidos en el equipo HT que permaneció en agitación durante 90 min a temperatura ambiente y 50 rpm, esta etapa se conoce como agotamiento primario a pH ácido de 5 (Etapa B-Figura 15). Al término de los 90 min los

baños de agotamiento fueron descartados (Etapa C-Figura 15). Luego se adicionó 50 mL de agua destilada en cada uno de los frascos de acero, los cuales fueron introducidos en el equipo HT que estaba a temperatura ambiente (Etapa D-Figura15). Empleando una gradiente de 2°C/min, la temperatura del equipo se elevó hasta 60°C y permaneció en agitación por 10 min, inmediatamente se hizo una primera dosificación a los frascos de acero añadiendo 83 µL de una solución madre, la cual fue preparada disolviendo 1 g de hidróxido de sodio en 10 mL de agua destilada, el sistema nuevamente volvió a agitarse por 10 min, luego fue realizada una segunda dosificación con 167 µL de la misma solución madre, finalizada las dosificaciones el sistema se mantuvo en agitación por 10 min más, después de este tiempo, la temperatura del equipo fue incrementada a 90°C y mantenida en agitación por 20 min, esta etapa del proceso se denomina agotamiento secundario a pH básico de 11 y se visualiza en la curva de agotamiento de la Etapa E - Figura 15. Después de los 20 min, los tejidos fueron enjuagados en agua caliente a 70°C y fría a temperatura ambiente, en seguida fueron neutralizados con 0,5 g/L de ácido acético, enjuagados nuevamente en agua a temperatura ambiente y secados a 80°C, cada una de estas operaciones se realizaron por 5 min, esta etapa del proceso se denomina procesos posteriores (Etapa F-Figura15).

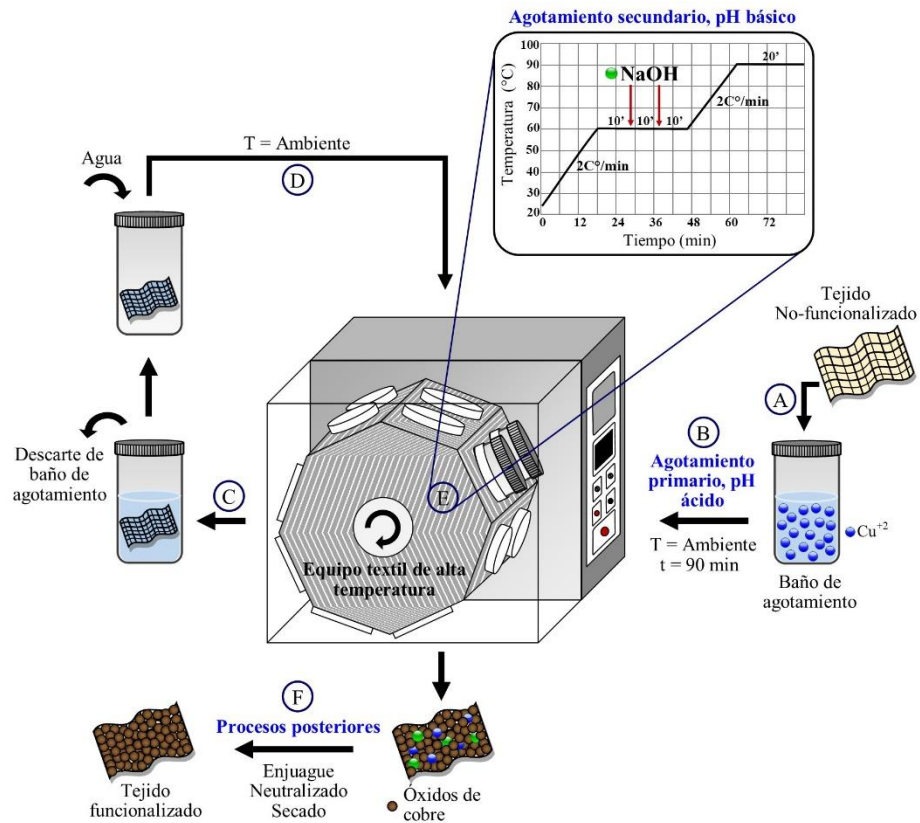


Figura 15. Esquema del proceso de funcionalización de tejidos de algodón con CuO_x por el método de teñido textil de agotamiento.

3.2.1. Toma de muestras

Se tomaron muestras de tejidos de algodón durante el proceso de funcionalización descrito en la sección 3.2. Las muestras extraídas tienen las siguientes características: (1) tejido a 25°C con sal de cobre obtenida al finalizar la etapa de agotamiento primario; (2) tejido a 60°C con sal de cobre y después de añadir el NaOH; (3) tejido a 90°C con sal de cobre y NaOH; (4) tejido a 70°C funcionalizado con CuO_x ; y (5) tejido funcionalizado luego de los procesos posteriores de enjuague y neutralizado. La Figura 16 detalla las condiciones de extracción y ubicación de las muestras.

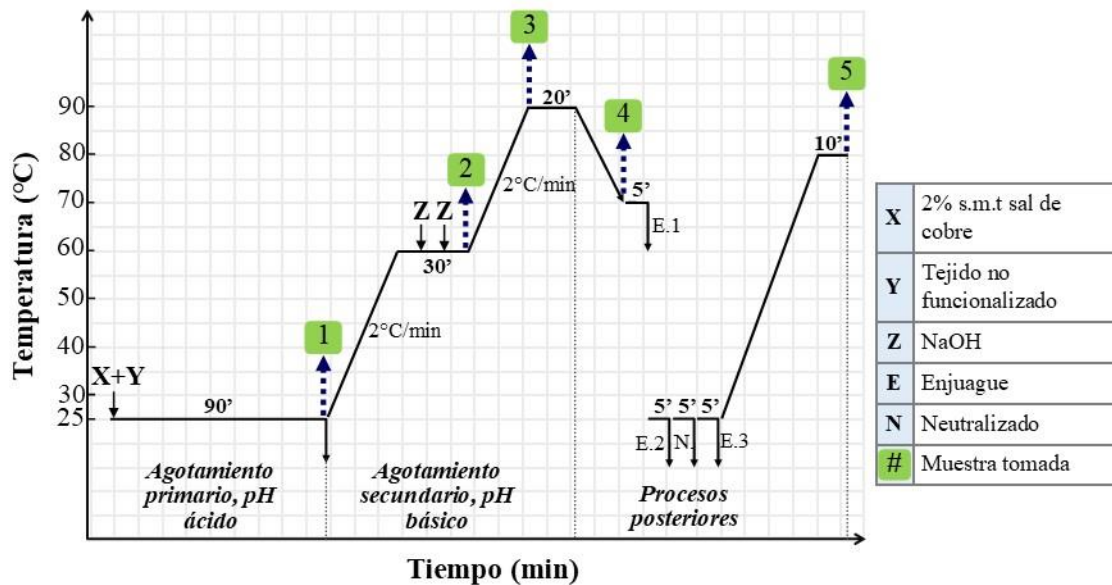


Figura 16. Toma de muestras de tejidos durante el proceso de funcionalización: (1) a 25°C con sal de cobre; (2) a 60°C con sal de cobre y NaOH; (3) a 90°C con sal de cobre y NaOH; (4) a 70°C funcionalizado con CuO_x ; y (5) funcionalizado con CuO_x más enjuagues y neutralizado.

3.3. Características colorimétricas del textil

Para la evaluación colorimétrica se realizaron mediciones múltiples de los tejidos con dos disparos por medición en el espectrofotómetro de reflectancia SF 550 marca Datacolor previamente calibrado con specularidad incluida (SCI), área de apertura pequeña (SAV) y con UV incluido (OFF). Se obtuvieron 31 valores espectrales de reflectancia en el rango del espectro visible de 400 a 700 nm, los cuales fueron transformados en coordenadas de color CIE $L^*a^*b^*$ para el iluminante D65 y con valores triestímulos del observador de 10° usando

el software Color Tools versión 1.1. Las evaluaciones fueron llevadas a cabo en el Laboratorio N°24 de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

3.4. Caracterización del textil

Los tejidos de algodón fueron caracterizados por espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS), espectrometría de masas de iones secundarios en el tiempo de vuelo (TOF-SIMS) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

3.4.1. ICP-MS

La determinación de la cantidad de cobre presente en los baños de agotamiento de las tres sales cobre, en el tejido no funcionalizado y en los tejidos extraídos durante el proceso de funcionalización con CuO_x fue realizada por espectrometría de plasma de acoplamiento inductivo empleando un espectrómetro de modelo iCAP RQ de la marca Thermo Fisher Scientific. La preparación de las muestras fue por medio del método de digestión. Los análisis fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Isótopos y Metales en el Medio Ambiente de la Universidad Estatal de Pensilvania, Pensilvania, Estados Unidos.

3.4.2. XPS

Los espectros de fotoelectrones de rayos X del tejido no-funcionalizado y de los tejidos extraídos en el proceso de funcionalización con CuO_x se adquirieron empleando un espectrómetro de fotoelectrones de rayos X Escalab 250 Xi de la marca Thermofisher. Se utilizó una fuente de rayos X monocromática de $\text{Al K}\alpha$ ($h\nu = 1486,6$ eV). Para todas las muestras, se utilizó la energía de paso de 20 eV y tamaño de paso de adquisición de 0,1 eV. Los análisis fueron realizados en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (Cimav), Chihuahua, México.

3.4.3. TOF-SIMS

La caracterización de superficie se llevó a cabo por espectrometría de masas iónicas secundarias en el tiempo de vuelo, utilizando el instrumento TOF.SIMS 5 IONTOF equipado con una fuente de pistola de iones metálicos líquidos de bismuto (Bi_n^{m+} ; $n = 1 - 5$, $m = 1, 2$). Para la obtención de los espectros fue empleado un haz de iones primarios de Bi^{3+} con ángulo de incidencia de 45° a una energía de impacto de 25 keV. Los espectros de masas de iones secundarios positivos se calibraron usando H^+ , C^+ , C_2H_3^+ , C_3H_5^+ , C_4H_7^+ . Los análisis se realizaron en la Instalación de Instrumentación Analítica de la Universidad Estatal de Carolina del Norte, Carolina del Norte, Estados Unidos.

3.4.4. MEB

La caracterización morfológica de los tejidos textiles fue efectuada por microscopía electrónica de barrido. Las muestras textiles fueron recubiertas con una capa iridio de 6 nm de espesor. La magnificación utilizada para el análisis fue de 5000 a 120 000 veces. Se utilizó un microscopio de emisión de campo de la marca Thermo Fisher Scientific y modelo Apreo S del Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Estatal de Pensilvania, Pensilvania, Estados Unidos.

3.5. Evaluación microbiológica

La evaluación microbiológica de los tejidos fue realizada usando la norma técnica ASTM E2149:2013 (American Society for Testing and Materials - ASTM, 2013). El procedimiento consistió en cultivar las cepas *Escherichia coli* (ATCC 25922) y *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 10145) en caldo tripticasa de soya (TSB – *Tryptic Soy Broth*) estéril por 18 h a 35°C . Al término de este tiempo, el caldo TSB con las cepas bacterianas fueron centrifugados por 5 min. Los precipitados obtenidos se lavaron dos veces con una solución de tampón estéril de 0,3 mM de fosfato de potasio monobásico (KH_2PO_4), luego fueron diluidos con la solución tampón hasta alcanzar una concentración bacteriana de $1,5-3,0 \times 10^5$ UFC (Unidades Formadoras de Colonia)/ml. Esta solución fue la dilución bacteriana de trabajo. Las muestras de tejidos estériles con peso de $1,0 \pm 0,1$ g fueron colocadas dentro de frascos de vidrio estériles que contenían 50 mL de la dilución bacteriana de trabajo. Los frascos conteniendo

los tejidos fueron incubados a 35°C y agitados con máxima revolución durante 1 h. Después del tiempo de 1 h, la solución tampón que estaba en contacto con los tejidos fue diluida y sembrada por triplicado en placas Petri que contenían el medio de cultivo agar tripticasa de soya (TSA – *Tryptic Soy Agar*). Las placas Petri con TSA fueron incubadas a 35°C. Posteriormente, fue realizada la lectura a las 24 h de incubación. Las evaluaciones fueron realizadas en la Facultad de Ingeniería Forestal y Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Tumbes y en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de la Universidad Peruana Cayetano Heredia.

3.6. Pruebas de resistencia al lavado del textil

La resistencia a los ciclos de lavado de los tejidos funcionalizados con CuO_x se llevó a cabo empleando la metodología de la norma técnica internacional ISO 105-C06:2010 – Prueba B1M con algunas adaptaciones (ISO 105-C06, 2010). La prueba B1M simula cinco lavados a máquina, tanto en lavanderías comerciales como en casa. El procedimiento consistió en preparar una solución de lavado, para ello se disolvió 4 g de detergente sin blanqueador óptico (WOB del término en inglés *without optical brightener*) en un litro de agua destilada, seguidamente 150 mL de esta solución fue vertida en frascos de acero de 500 mL de volumen. En cada frasco fueron añadidas las muestras de tejidos y 50 esferas de acero para simular la fricción que sucede durante los procesos de lavados. Los frascos con la solución de lavado, las esferas de acero y el tejido fueron introducidos en un equipo de lavado denominado laundrómetro que estaba precalentado a 50°C. El laundrómetro fue encendido y mantenido en rotación a 40 rpm por 45 min y 50°C. Al finalizar el ciclo de lavado de 45 min, las muestras fueron enjuagadas dos veces con agua destilada a 40°C por 1 min y secadas en una estufa a una temperatura no mayor de 60°C. Las muestras funcionalizadas a partir de las tres sales de cobre fueron sometidas a 5, 15 y 25 ciclos de lavado. La prueba fue llevada a cabo en el Laboratorio N°24 de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

3.7. Control de calidad textil

Los controles de calidad de los tejidos con y sin funcionalización de CuO_x fueron evaluados de acuerdo a las metodologías de normas técnicas internacionales con algunas modificaciones.

3.7.1. Propiedades físicas

3.7.1.1. Ligamento del tejido

La estructura del tejido fue determinada según el protocolo de la norma ABNT NBR 12996:1993 (NBR 12996, 1993). El ensayo consistió en cortar una muestra del tejido de algodón de 10 cm x 10 cm, luego se deshiló el tejido hasta formar una franja de 2 mm de ancho. Con ayuda de un cuenta-hilos y una aguja se retiró el primer hilo de urdimbre (hilo paralelo al orillo de la tela) y fue registrado en un papel cuadriculado su entrelazamiento con el hilo de trama (hilo perpendicular al orillo).

3.7.1.2. Título del hilo extraído del tejido

El título o La densidad lineal de los hilos extraídos del tejido fue calculado siguiendo la metodología descrita en la norma ISO/FDIS 7211-5:2020 (ISO-FDIS-7211-5, 2020). Fueron cortados cuatro tiras de tejidos rectangulares de 50 cm de largo, dos de ellas contenían diferentes hilos de urdimbre y las restantes diferentes hilos de trama. De las tiras cortadas fueron extraídos 50 hilos, tanto en el sentido de la urdimbre como de la trama, seguidamente, se aplicó una pequeña tensión en uno de los extremos de los hilos con el propósito de eliminar su ondulación. Finalmente fue medido y pesado los hilos, para después calcular la media aritmética. Los resultados se expresaron en el sistema indirecto de número inglés (*Ne – Number english*).

3.7.1.3. Densidad de hilos del tejido

La determinación de la densidad de los hilos del tejido o número de hilos por unidad de longitud fue realizada de acuerdo con la norma técnica ABNT NBR 10588:2015 (NBR10588, 2015). La cantidad de hilos existentes en 2,5 cm en sentido de urdimbre y trama de las muestras con y sin funcionalización fueron contadas con el uso de un cuenta-hilos. Fueron contados cinco veces en cada sentido de manera que la serie de hilos eran diferentes. Las medias aritméticas fueron calculadas y los resultados se reportaron en número de hilos por centímetro (hilos/centímetro).

3.7.2. Pruebas de solidez del color

La determinación y evaluación de las solidez de color del tejido funcionalizado con CuO_x fueron realizadas con metodologías de normas técnicas.

3.7.2.1. Solidez al lavado

La solidez al lavado se determinó con la norma ISO 105-C06:2010 – Prueba B1M (ISO 105-C06, 1994). Muestras de tamaño 4 cm x 10 cm fueron cortadas de los tejidos funcionalizados con CuO_x y de un tejido testigo de múltiples fibras (multifibra DW). Ambos tejidos fueron unidos por medio de una costura por uno de los lados de menor tamaño. Las muestras cocidas fueron colocadas en un frasco de acero que contenía 50 esferas de acero y 150 mL de una solución de lavado de concentración 4 g/L preparada a partir del detergente sin blanqueador óptico. Los frascos de acero fueron introducidos en el equipo laundrómetro precalentado a 50°C. El equipo se mantuvo en rotación a 40 rpm por 45 min y 50°C. Al culminar el ciclo de lavado de 45 min, las muestras fueron lavadas y enjuagadas dos veces con agua destilada a 40°C por 1 min. Las muestras fueron secadas en una estufa con temperatura no mayor de 60°C. Posteriormente, se realizó la evaluación visual de la solidez en una cabina de luces con la luz D65 y ángulo de incidencia del observador de 45° empleando las escalas de grises para cambio de color y transferencia de color y la metodología descrita en la norma ISO 105-A02. La prueba se realizó en el Laboratorio N° 24 de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

3.7.2.2. Solidez al sudor

La solidez al sudor se realizó siguiendo la metodología de la norma ISO 105-E04:2013 (ISO 105-E04, 2013). El procedimiento consistió en preparar inicialmente un litro de una solución de sudor acida de pH 4.3 mezclando 10 g de cloruro de sodio, 1 g de ácido láctico, 1 g de hidrofosfato y 0.25 g de L-histidina. Después, fueron preparadas muestras de ensayo cociendo uno de los lados más cortos de áreas iguales de 4 cm x 10 cm de un tejido funcionalizado con CuO_x con un tejido de múltiples fibras. Las muestras de ensayo fueron colocadas en placas Petri de 90 x 20 mm que contenían 150 mL de la solución de sudor, permanecieron sumergidas durante 30 min a temperatura ambiente. Después de este periodo,

fueron escurridas las muestras de ensayo y se colocaron entre placas de resina acrílica, las cuales fueron ubicadas en el equipo de transpiración. El equipo de transpiración conteniendo las muestras de ensayo, fue introducida dentro de una estufa durante 6 h a 38°C. Al terminar las 6 h las muestras fueron retiradas y secadas a temperatura ambiente. La evaluación de solidez fue realizada visualmente en la cabina de luces con la luz D65, ángulo de incidencia del observador de 45°, usando las escalas de grises para cambio de color y transferencia de color según lo descrito en la norma ISO 105-A02. La prueba se llevó a cabo en el Laboratorio de Materiales Funcionales y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias y la evaluación en el Laboratorio N° 24 de la Facultad de Ingeniería Química y Textil, ambos de la Universidad Nacional de Ingeniería.

CAPÍTULO IV: DISCUSIONES E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección son presentados y discutidos los resultados obtenidos en la funcionalización de tejidos de algodón con óxidos de cobre, medición de las características de color, caracterizaciones de los tejidos, evaluación microbiológica, resistencia de los tejidos a los lavados domésticos y controles de calidad.

4.1. Funcionalización del textil con CuO_x

Fue realizada la funcionalización *in situ* de tejidos de algodón de $296,41 \text{ g/m}^2$ con CuO_x utilizando 2% s.m.t de $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$; $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ y $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; y 0.5 g/L de NaOH.

La Tabla 2 presenta la nomenclatura del tejido antes del proceso de funcionalización y de los tejidos extraídos durante el mismo proceso, tal como se describió en la sección 3.2.1.

Tabla 2. Nomenclatura de las muestras textiles antes y durante su extracción en el proceso de funcionalización de con CuO_x

Características de las muestras textiles	Sal		
	Acetato de cobre	Nitrato de cobre	Sulfato de cobre
No-funcionalizado		NF	
A 25°C con sal de cobre	A1	N1	S1
A 60°C con sal de cobre + NaOH	A2	N2	S2
A 90°C con sal de cobre + NaOH	A3	N3	S3
A 70°C funcionalizado con CuO_x	A4	N4	S4
Funcionalizado con CuO_x más enjuagues y neutralizado	A5	N5	S5

Tamaños de 1,5 cm x 7,0 cm del tejido NF y los tejidos obtenidos durante el proceso de funcionalización empleando las tres sales de cobre de acetato, nitrato y sulfato son mostrados en la Figura 17.

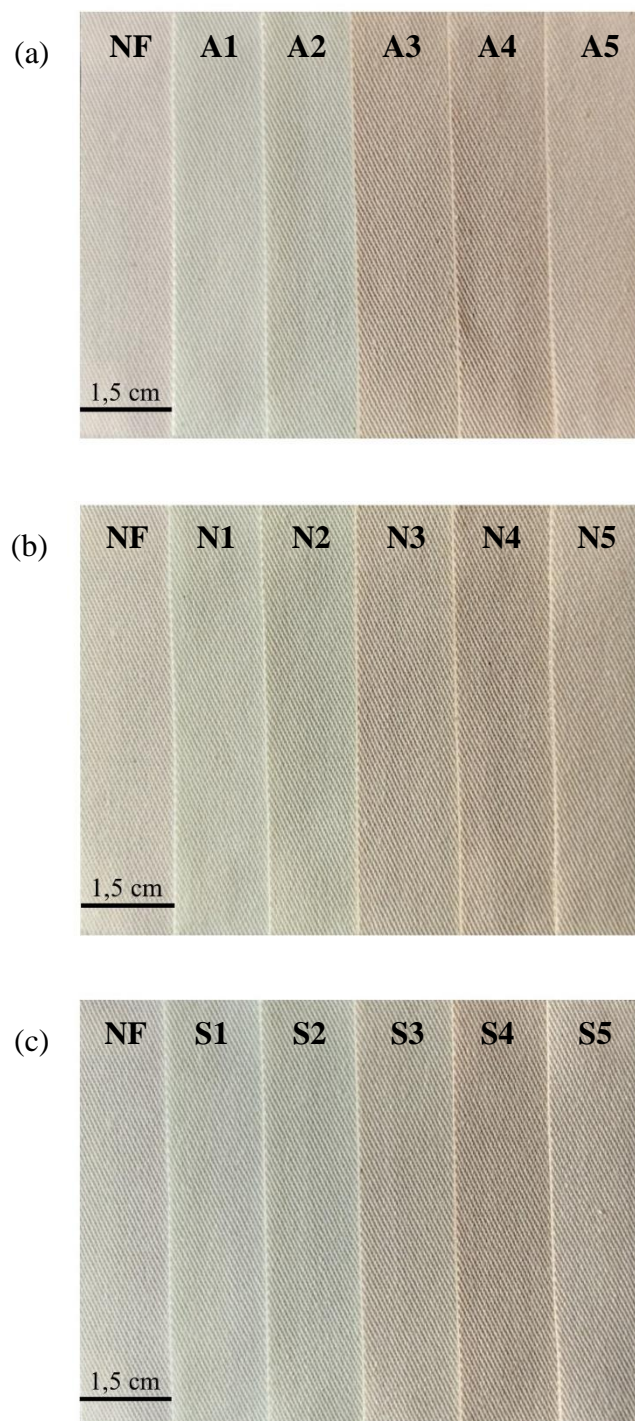


Figura 17. Muestras del tejido no-funcionalizado y de los tejidos extraídos durante el proceso de funcionalización con CuO_x a partir de sales de cobre de: (a) acetato, (b) nitrato y (c) sulfato.

4.2. Características colorimétricas del textil

Las Figuras 18(a) y 18(b) muestran las coordenadas de color en el espacio CIE $L^*a^*b^*$ del tejido no-funcionalizado y de los tejidos extraídos durante proceso de funcionalización

utilizando 2% s.m.t de tres sales diferentes de cobre. El tejido NF tiene un valor de luminosidad (L^*) de 93,61 y coordenadas de color a^* y b^* de -0,55 y 5,01, respectivamente. Estos valores indican que el textil es de tono amarillo con alta luminosidad. Después de la etapa de agotamiento primario se observa que el L^* del tejido NF disminuyó ligeramente hasta valores de 89,12; 90,27 y 90,28 para A1, N1 y S1, respectivamente, de igual modo, la coordenada b^* se redujo, sus valores obtenidos fueron de 2,82 para A1; 3,19 para N1 y 3,23 para S1. En el caso de la coordenada a^* se percibió una notable disminución, cuyos valores mínimos alcanzados fueron -6,28; -4,88 y -4,84 para A1, N1 y S1, en su orden respectivo.

Debido a estas variaciones, especialmente de la coordenada a^* , los tejidos adquirieron una tonalidad amarilla-verdosa que puede estar asociada con la existencia de complejos de cobre (II) en el textil, puesto que las sales cúpricas disueltas en agua forman el ion *aquo* ($[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$) que son de colores azules o verdes (Cotton & Wilkinson, 1972). La tonalidad amarilla-verdosa puede ser vista en la Figura 17.

Luego de la adición del hidróxido de sodio y a la temperatura de 60°C, la luminosidad de las muestras A2, N2 y S2 continuó disminuyendo y se obtuvieron valores de 86,51; 86,54 y 86,97; respectivamente, sus coordenadas de color a^* y b^* presentaron ligeras variaciones mínimas de 0,25 y máximas de 0,57; estos resultados indican que los tejidos se tornaron más oscuros y mantuvieron su tonalidad verdosa. Al alcanzar la temperatura de 90°C, los óxidos de cobre comenzaron a sintetizarse y su presencia inicial en los tejidos se reflejó con una fuerte reducción de la luminosidad y con la subida hacia los tonos rojos, es decir, hubo aumento de la coordenada a^* hacia valores positivos. Esta afirmación se corrobora observando los valores de a^* de las muestras A3 y N3 que fueron +0,91 y +0,09, respectivamente, asimismo, sus valores L^* alcanzados fueron de 76,7 y 80,1 en su orden respectivo, estas variaciones ocasionaron la modificación de tonalidad de los tejidos hacia un pardo oscuro. El comportamiento mencionado para las muestras A3 y N3 se pudo apreciar de forma parcial en la muestra S3, donde su coordenada a^* tuvo un incremento de 2,37, pero aun así se mantuvo en el eje negativo con un valor final de -2,52, por esta razón, su tonalidad resultó menos verdosa y ligeramente más oscura.

Tras 20 min de agitación a 90°C y un enfriamiento hasta 70°C, se visibilizó que las muestras A4, N4 y S4 disminuyeron en luminosidad y alcanzaron valores mínimos de 74,89; 77,48 y 77,02; respectivamente, mientras que sus coordenadas a^* presentaron valores máximos; en su orden respectivo de 1,78; 1,41 y 1,33. Estos resultados indicaron que los tejidos presentaron una tonalidad parda rojiza más oscura que las muestras de la etapa

anterior (A3, N3 y S3), tal como se puede apreciar en la Figura 17. Según la investigación desarrollada por Huang *et al.* (2020), se produce un cambio de tonalidad de marrón a rojo oscuro conforme disminuye la luminosidad del color en tejidos de fibra de poliéster recubiertas con óxidos de cobre; ellos concluyeron que el contenido de iones Cu^{+1} y Cu^{+2} en el recubrimiento influenciaron en la tonalidad del textil (M.-L. Huang et al., 2020). Por lo tanto, el incremento de tonalidad rojiza y la baja luminosidad de las muestras A4, N4 y S4 puede estar relacionada con la mayor presencia de CuO_x sintetizadas *in situ* en los tejidos de algodón.

Después de los procesos posteriores de enjuague y neutralización, se aprecia que la luminosidad de las muestras A5, N5 y S5 aumentaron en aproximadamente 5% con respecto a las muestras A4, N4 y S4. Este cambio podría estar asociado a la remoción de los óxidos de cobre que permanecieron en la superficie de la fibra de algodón por medio de los enjuagues, resultando tejidos más claros con tonalidad parda menos roja. De esta forma, se puede concluir que el tejido NF de tono inicial amarillo con alta luminosidad, con el transcurso del proceso de funcionalización empleando 2% s.m.t de sal de cobre, se fue tornando verdoso y finalmente pardo rojizo posiblemente debido a la presencia de óxidos de cobre.

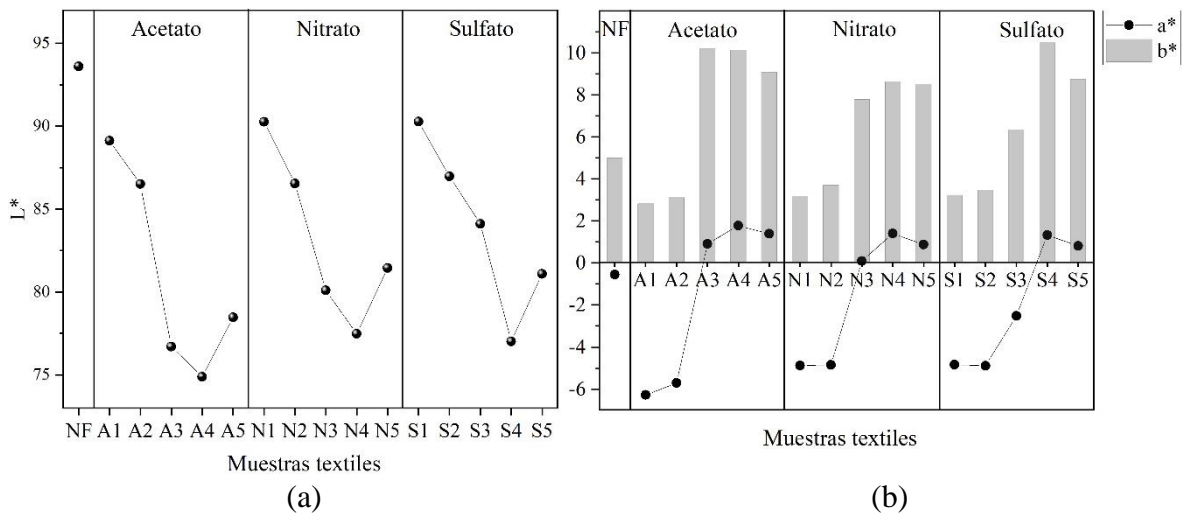


Figura 18. Coordenadas de color CIE $L^*a^*b^*$ del tejido no-funcionalizado y de tejidos extraídos en el proceso de funcionalización con CuO_x a partir de sales de cobre de acetato, nitrato y sulfato: (a) L^* y (b) a^* y b^* .

4.3. Caracterización del textil

Los resultados de las caracterizaciones de análisis elemental, superficial y morfológica de los tejidos obtenidos antes, durante y después del proceso de funcionalización serán mostradas en las secciones del 4.3.1 al 4.3.4.

4.3.1. ICP-MS

En función de los resultados obtenidos en colorimetría, donde el cambio de tonalidad de amarillo a pardo-rojizo del tejido no funcionalizado sugirió la presencia de óxidos de cobre, se realizó un análisis químico elemental por ICP-MS, con la finalidad de determinar la concentración de cobre (Cu) en las muestras textiles.

La Figura 19 presenta los resultados de la cantidad de Cu en los baños de agotamiento de las tres sales de cobre, en el tejido no-funcionalizado y en los tejidos extraídos durante proceso de funcionalización con CuO_x . La cantidad de Cu en los baños de agotamiento preparadas a partir de las sales de acetato, nitrato y sulfato de cobre fue de 4.955,55; 5.409,97 y 5.221,25 mg/L, respectivamente, estos valores fueron considerados como cantidad inicial de cobre (100% de concentración).

El teñido por agotamiento es un proceso físico químico, donde las moléculas del colorante disueltas en una solución (baño de tintura) son transportadas hasta la superficie del sustrato textil, el colorante se adsorbe sobre la superficie del sustrato y se difunde hacia el interior de las fibras; el agotamiento integra todos aquellos procesos que se caracterizan por producirse una disminución de la concentración del colorante en el baño de tintura (agotamiento) y al mismo tiempo un aumento de la concentración de colorante en el material textil (Cegarra, 1987; M. Clark, 2011b). En nuestro caso y de acuerdo con lo expresado en la literatura, durante la etapa del agotamiento primario a pH ácido, las muestras de tejidos de algodón adsorbieron y difundieron el Cu procedente del baño de agotamiento, por consiguiente, se incrementó la concentración de este elemento en las superficies y/o matrices internas de la fibra de algodón. Esta afirmación se observa al comparar la cantidad de 0,009% de Cu de la muestra NF con las cantidades de Cu obtenidas después del agotamiento primario, cuyos porcentajes aproximados fueron de 54, 42 y 42% para las muestras A1, N1 y S1, respectivamente. De estos resultados se percibe que el tejido de algodón absorbió mejor el baño de agotamiento preparado a partir de la sal de acetato de cobre.

La fibra de algodón madura está compuesta por 88 a 99,5% de celulosa, su reactividad química es la misma que el polímero de celulosa que es un polisacárido cuya estructura molecular está conformada por átomos de C, O y H (Petrucci et al., 2011; Ruiz-Caldas et al., 2022; Wakelyn & French, 2006), tal como se vio en las secciones 2.3.1.2 y 2.3.1.3. En consecuencia, el mayor porcentaje de agotamiento del Cu del tejido de algodón en contacto con la solución de $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ podría estar relacionado a la similitud en composición química elemental del acetato con la celulosa del algodón, es decir, mismos átomos de C, O y H, por ello habría mayor afinidad química para ingresar a la matriz celulósica en comparación con las otras dos sales inorgánicas de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ y $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

Con referencia a las muestras A1, N1 y S1 se aprecia que después de la adición del hidróxido de sodio la cantidad de Cu se redujo en 1, 5 y 4% para las muestras A2, N2 y S2, respectivamente, y con el incremento de la temperatura hasta 90°C el Cu continuó disminuyendo, obteniéndose variaciones de 3% para A3, 6% para N3 y 2% para S3. Estas ligeras variaciones en la cantidad de Cu pueden estar asociadas al desprendimiento del Cu presente en el tejido de algodón hacia el nuevo volumen de agua añadido al comienzo de la etapa de agotamiento secundario, de tal forma que quedaron partículas de cobre en la fase líquida. Tras 20 min de agitación a 90°C y enfriamiento a 70°C, la cantidad de Cu siguió disminuyendo y alcanzó variaciones de porcentajes de alrededor de 13, 6 y 6% para las muestra A4, N4 y S4, respectivamente. Esta pérdida puede estar relacionada con la reacción química entre los iones Cu^{2+} y los iones OH^- generados por la ionización del NaOH en agua, que produjeron $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y con el incremento de la temperatura CuO_x (mostrado en las ecuaciones 2.8 y 2.9 - sección 2.4.1.3), quedando una parte del CuO_x en el algodón y otra en la suspensión remanente producida en la etapa de agotamiento secundario.

En los procesos posteriores, la cantidad de Cu continuó decreciendo hasta los valores mínimos de 40,8; 32,2 y 27,3% correspondientes a las muestras A5, N5 y S5, en orden respectivo, esta pérdida se debe a la remoción de los óxidos de cobre sintetizados en la superficie del tejido y que no se adhirieron a la fibra durante los enjuagues al finalizar el proceso de funcionalización (S. Nam et al., 2020).

Según las investigaciones realizadas por Oliveira *et al.* (2016) y Ghaly *et al.* (2014), hay una alta concentración de colorantes que no se fijan en los sustratos textiles y que se encuentran en aguas residuales de procesos de teñido textil, los colorantes no fijados dependen del tipo de colorante y fibra, estas concentraciones están comprendidas entre 2 a

50% de la concentración inicial del colorante (Ghaly et al., 2014; Oliveira et al., 2016). Además de ello, los colorantes no fijados en los materiales textiles también pueden ser originados por el uso de productos inadecuados o por procesos mal ejecutados que generan la hidrólisis de los colorantes, es decir, la reacción del colorante con el agua. Asumiendo que los óxidos de cobre representan un tipo colorante y con base a las investigaciones anteriores, podríamos indicar que el 59,2; 67,8 y 72,7% restante de la cantidad de Cu no fijado en las muestras A5, N5 y S5, respectivamente, son desechadas en las aguas residuales de los baños de agotamiento primario, secundario y procesos posteriores, además de ello, estos porcentajes estarían fuera del rango de valores de colorantes comerciales no fijados. Estos resultados muestran que se debe reutilizar el baño de agotamiento primario de las tres sales de cobre, mejorar la absorción del tejido de algodón con algún producto químico previo al proceso de funcionalización, emplear un agente de reticulación, entre otros, con el objetivo de aumentar la permanencia de los CuO_x en los tejidos y minimizar la cantidad descarga de cobre a las aguas residuales.

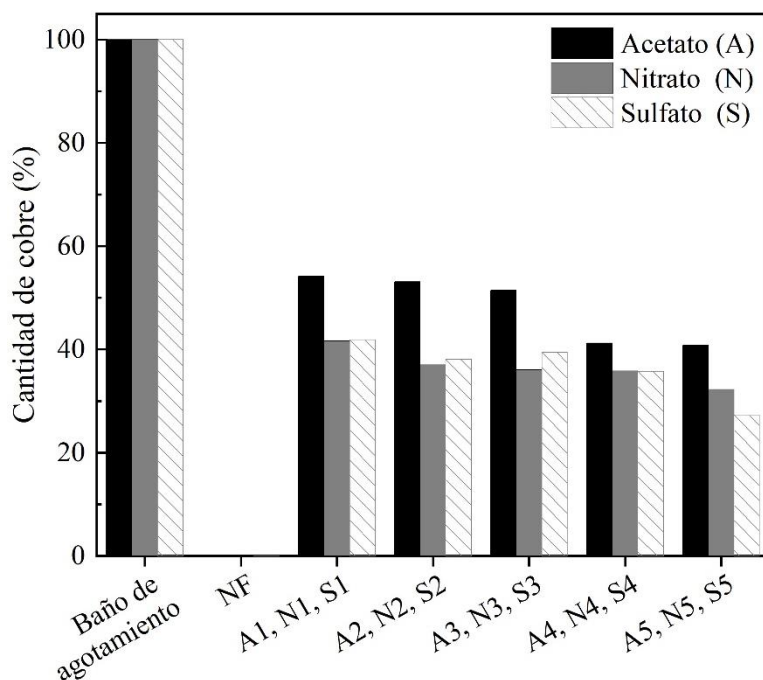


Figura 19. Cantidad de Cu medidos por ICP-MS en soluciones de sales de cobre, tejido no-funcionalizado y tejidos extraídos en el proceso de funcionalización con CuO_x a partir de acetato, nitrato y sulfato de cobre.

4.3.2. XPS

Los resultados del estudio de análisis de superficie del tejido no-funcionalizado (NF) y de los tejidos obtenidos durante y después de ser funcionalizados con CuO_x utilizando 2% s.m.t de sal de acetato, nitrato y sulfato de cobre, son mostrados a continuación.

En la Figura 20(a-c), el amplio espectro XPS de la muestra NF se caracteriza por la presencia del elemento oxígeno como O1s, O2s, OKL1, OKL2 y del carbono como C1s y CKL1, estos picos de O y C son atribuidos a la fibra de algodón (Tharwat I. Shaheen, Fouda, & Salem, 2021; Yu et al., 2019). Asimismo, se percibe que a partir de las muestras A1, N1 y S1 en adelante (A4, A5, N4, N5, S4 y S5), comienza a manifestarse picos de fotoelectrones del cobre (Cu 2p) que demuestra que el CuO_x fue adherido con éxito en la superficie del algodón.

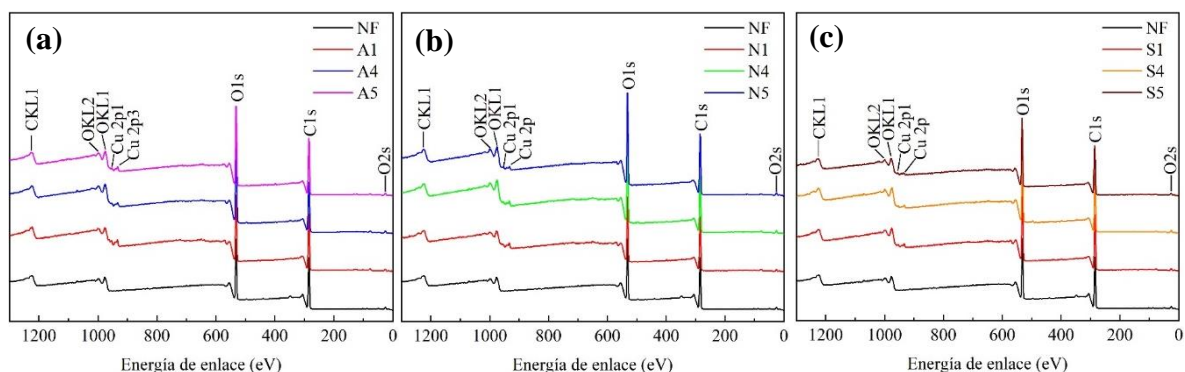


Figura 20. Amplio espectro XPS del tejido no-funcionalizado y tejidos extraídos en el proceso de funcionalización con CuO_x usando sal de cobre: (a) acetato, (b) nitrato y (c) sulfato.

El espectro del carbono (C1s) del algodón se descompone en tres contribuciones C1, C2 y C3, y representan lo siguiente: C1 a átomos de carbono unidos solo al carbono o al hidrógeno (-C-C- o -C-H); C2 a átomos de carbono unidos con un enlace simple a un átomo de oxígeno (-C-O) y; C3 átomos de carbono enlazados a un átomo de oxígeno mediante doble enlace o por enlace simple a dos átomos de oxígeno (C=O o O-C-O) (Pertile et al., 2010; Yu et al., 2019). La Tabla 3 resume las energías de enlace y los porcentajes de cada contribución C1, C2 y C3 que figuran en los espectros XPS del tejido no-funcionalizado y tejidos extraídos durante el proceso de funcionalización con CuO_x usando las tres diferentes sales de cobre.

Tabla 3. Espectros principales de picos del C1s basadas en sus energías de enlace para el tejido no-funcionalizado y tejidos extraídos en el proceso de funcionalización con CuO_x

C1s	Muestras de tejidos									
	NF	A1	A4	A5	N1	N4	N5	S1	S4	S5
C1	284,8 (49%)	284,7 (48%)	284,9 (35%)	284,8 (36%)	284,8 (47%)	284,8 (29%)	284,8 (33%)	284,8 (40%)	284,8 (41%)	284,8 (38%)
C2	286,4 (39%)	286,3 (40%)	286,6 (49%)	286,4 (48%)	286,4 (38%)	286,5 (54%)	286,4 (52%)	286,5 (48%)	286,5 (46%)	286,4 (44%)
C3	288,0 (12%)	287,8 (12%)	288,0 (15%)	287,9 (16%)	288,0 (15%)	288,0 (17%)	287,9 (15%)	288,0 (12%)	288,0 (13%)	287,9 (18%)

La comparación entre los espectros del carbono de alta resolución C1s de la muestra NF y de las muestras obtenidas después de la etapa de agotamiento primario, para las tres sales de cobre (A1, N1 y S1), se presentan en la Figura 21. Según los resultados presentados en la Tabla 3 y con referencia al NF, se puede apreciar que para la muestra A1 las contribuciones C1, C2 y C3 tuvieron una variación hacia valores de menor energía de 0,1; 0,1; y 0,2 eV, en su orden respectivo, asimismo, la intensidad del pico C1 disminuye en 1% y del C2 aumenta en 1% también, en el C3 no hubo ninguna modificación. En el caso de la muestra N1, sus energías de enlace de las tres contribuciones permanecieron constantes, sin embargo, las intensidades de C1 y C2 decrecieron entre 1 a 2%, opuesto al C3 que creció en 3%. Para la muestra S1, se pudo ver que las energías de enlace de C1 y C3 no se modificaron, sólo el C2 se desplazó hacia energías mayores en un valor de 0,1 eV; por otra parte, la intensidad del pico C3 se mantuvo estable, C1 se redujo en 9% y C2 fue acrecentado en 9%. Estas pequeñas variaciones, tanto en las energías de enlace como en las intensidades del carbono en las muestras A1, N1 y S1, pueden estar asociadas a un cambio de entorno del carbono del algodón y, este cambio estaría comenzando en la etapa de agotamiento primario y podría estar relacionado a la presencia del cobre.

La superficie de las fibras celulósicas cuando se sumergen en agua se ionizan debido a la presencia de los grupos carbonilo e hidroxilo (Gordon & Hsieh, 2007; Ribitsch & Stana-Kleinscheck, 1998). Por otra parte, en solución acuosa las tres sales cúpricas estudiadas, forman el mismo complejo *aquo* de cobre con dos cargas positivas [Cu(H₂O)₆]²⁺ (Brown et al., 2022; Cotton & Wilkinson, 1972), pero con diferente anión. Dicho anión tendrá una barrera electrostática para difundirse a través de la fibra algodón porque estará cargada negativamente. Por consiguiente, en la etapa de agotamiento primario, el cobre del complejo *aquo* empieza a coordinarse con la superficie del algodón ionizado, por ello el tejido adquiere

una tonalidad amarilla-verdosa (discutida en la sección 4.2) que es resistente a ciclos de lavados domésticos (Luz E. Román et al., 2020). Esta resistencia a la pérdida de tonalidad sugiere la existencia de una fuerte interacción entre el algodón y el cobre; probablemente de tipo químico más que físico. En el estudio realizado por Ali *et al.* (2020), se propuso la existencia de una fuerte unión entre los iones Cu^{+2} y la superficie de tejidos de algodón metalizados con cobre, los cuales fueron previamente activados con partículas de plata y cobre, además, estos autores mencionan la formación de enlaces iónicos entre los grupos negativos del algodón y el ion Cu^{+2} (Ali et al., 2020). Zhang *et al.* (2014), reportaron la formación de enlaces covalentes entre una fibra del algodón tratada con sulfato de titanio, urea y bromuro de hexadecilo trimetilamonio y el dióxido de titanio (TiO_2); ellos proponen que el TiO_2 reacciona con el algodón a través del grupo hidroxilo del carbono 6 de la celulosa de esta misma fibra (H. Zhang, Zhu, & Sun, 2014). También, otros autores hablan que la reacción más importante en el tratamiento de textiles celulósicos con sales metálicas, es la interacción de intercambio iónico entre los grupos carboxílicos de la celulosa y los iones metálicos (Emam, 2019). A partir de estas investigaciones se infiere que los grupos negativos del algodón están formando un enlace de tipo químico con los iones metálicos.

Para nuestro caso y con los hallazgos reportados en la literatura, se puede concluir que existe una interacción química entre los grupos hidroxilos de la celulosa del algodón y el cobre. El posible mecanismo de reacción entre estos dos materiales podría originarse por el reemplazo de algunas de las moléculas de agua del complejo de cobre (II) por los oxígenos de la celulosa ionizada, los cuales tienen pares de electrones desapareados que pueden formar enlaces coordinados con el ion metálico, produciéndose así, un probable complejo de cobre-algodón.

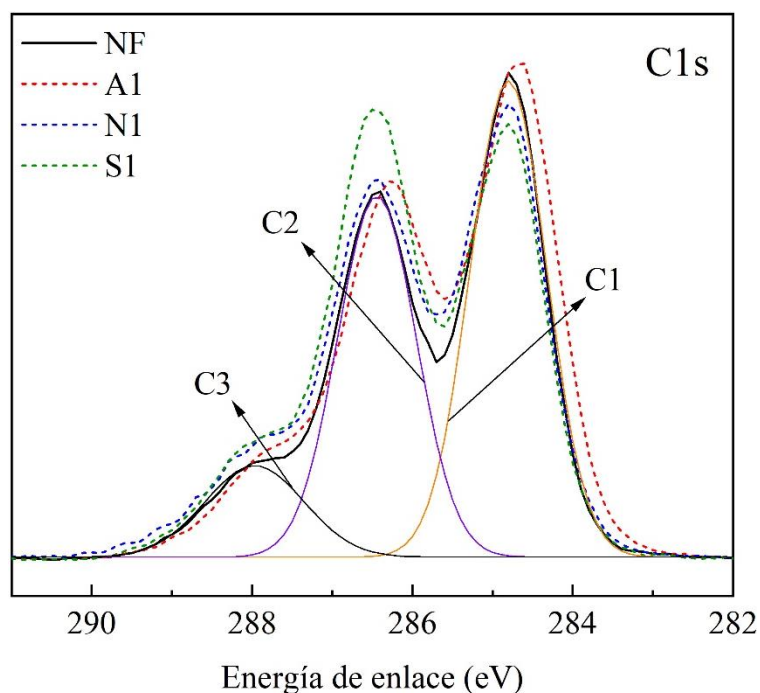


Figura 21. Espectros XPS de C1s del tejido no-funcionalizado y tejidos extraídos a 25°C con sal de acetato, nitrato y sulfato de cobre (etapa de agotamiento primario).

Los espectros de C1s de las muestras extraídas después de la adición del NaOH, incremento de temperatura a 90°C y enfriamiento a 70°C (A4, N4 y S4) son mostrados en la Figura 22. Con respecto al tejido NF, cuyas contribuciones C1, C2 y C3 se observaron en 284,8; 286,4 y 288,0 eV, respectivamente; los picos C1 y C2 de la muestra A4 fueron desplazados ligeramente a la izquierda, en otras palabras, sus energías de enlace incrementaron en 0,1 y 0,2 eV, respectivamente. En el caso de las muestras N4 y S4, sus energías de enlace de C1 se mantuvieron constante, contrario al C2 que aumentó en 0,1 eV. Nuevamente, estos ligeros desplazamientos de energía de las muestras A4, N4 y S4 indican que el sistema conformado por el algodón-cobre-hidróxido de sodio está modificando el entorno de las contribuciones C1 y C2 de la celulosa del algodón, pero no del pico C3 que permaneció constante.

El algodón tiene un pico de energía de enlace alrededor de 285,0 eV, que es atribuida a los grupos C-C/C-H (Mitchell et al., 2005). Este pico se puede asignar a los remanentes de ceras del algodón que son mezclas de hidrocarburos, alcoholes, ésteres y ácidos grasos, y/o asignar a una contaminación por hidrocarburos o a la modificación del polímero (Milošević et al., 2014; Mitchell et al., 2005; S. Yang et al., 2021). La contribución de C1 para las muestras A4, N4 y S4 aparece en $284,8 + 0,1$ eV y, pertenece a los enlaces C-C/C-H (Z.

Huang et al., 2022). La intensidad de esta contribución disminuyó entre 8 a 20%. De acuerdo con la literatura, esta disminución de C1 puede ser debido a la eliminación en el sobrenadante de alguna contaminación adventicia preexistente en el algodón y/o a la modificación de la misma fibra durante el proceso de agotamiento secundario.

Asimismo, la contribución C2, que se ubica en $286,5 \pm 0,1$ eV y que pertenece a los enlaces C-O (Z. Huang et al., 2022; S. Yang et al., 2021), incrementó su intensidad entre 7 a 15%. El grupo de investigación de Huang, C. (2018), modificó una fibra de eucalipto con plasma a baja temperatura (*LTP – Low Temperature Plasma*) dentro de una mezcla de aire y oxígeno y, encontraron que la intensidad del pico C2 mejoró, ello debido al efecto del tratamiento con LPT que expuso más hidroxilos en la superficie de las fibras (C. Huang et al., 2018). Por lo tanto, el incremento de C2 para A4, N4 y S4 estaría relacionado al efecto del NaOH, puesto que, habría mayor presencia de hidroxilos en la superficie de las fibras de algodón. La contribución C3 asociada con los enlaces O-C-O o C=O (288,0 eV) (Milošević et al., 2014; Mitchell et al., 2005; S. Yang et al., 2021), incrementó su intensidad en un valor mínimo de 1% y máximo de 5%. Este aumento de intensidad espectral podría deberse a la ruptura de los enlaces C-C, C-H o C-O que provoca la formación de grupos carbonilos o el componente O-C-O en la superficie de la fibra (C. Huang et al., 2018; Mitchell et al., 2005).

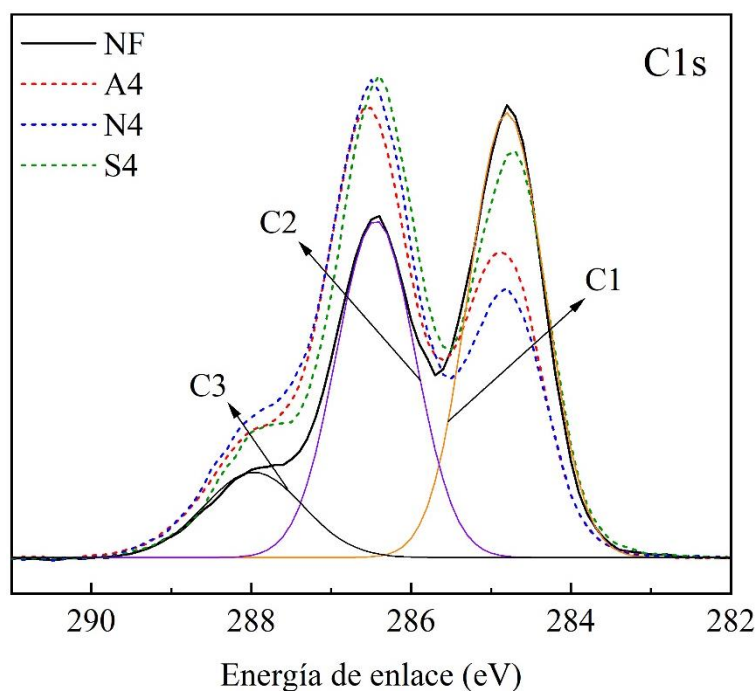


Figura 22. Espectros XPS de C1s del tejido no-funcionalizado y de tejidos extraídos después de añadir NaOH, incremento de temperatura a 90°C y enfriamiento a 70°C (etapa de agotamiento secundario).

La Figura 23 exhibe los espectros C1s de las muestras funcionalizadas con CuO_x , obtenidas después de los procesos posteriores de enjuague y neutralizado (A5, N5 y S5). Para todas estas muestras y con respecto al tejido NF, las energías de enlace de los picos C1 y C2 permanecieron constante, sólo el pico C3 presentó una pérdida de energía de 0,1 eV. Asimismo, la intensidad de la contribución C1 siguió disminuyendo, alcanzando porcentajes de pérdida de 11 a 16%. Esto podría estar relacionado con la eliminación, durante los enjuagues, de restos de carbonos y/o contaminación de la superficie del algodón. En el caso de la contribución C2, se reportó un incremento entre 5 a 9%. Estos porcentajes son más bajos en comparación con los resultados de C2 de las muestras anteriores (A4, N4 y S4), y pueden atribuirse a la remoción de grupos hidroxilos remanentes en la superficie del algodón por medio de los enjuagues y neutralizado. Al igual que C2, la contribución de C3 subió en promedio su intensidad en 4,3%, ello con respecto al NF. Según los resultados mostrados en la Tabla 3 y tomando como base a las muestras A4, N4 y S4 se puede apreciar que el C3 tuvo una variación mínima de 1 y 2% para las muestras A5 y N5, respectivamente, y 5% para S5. Estos resultados indican que los enlaces que pertenecen a O-C-O o C=O no son afectados fuertemente por los enjuagues realizados.

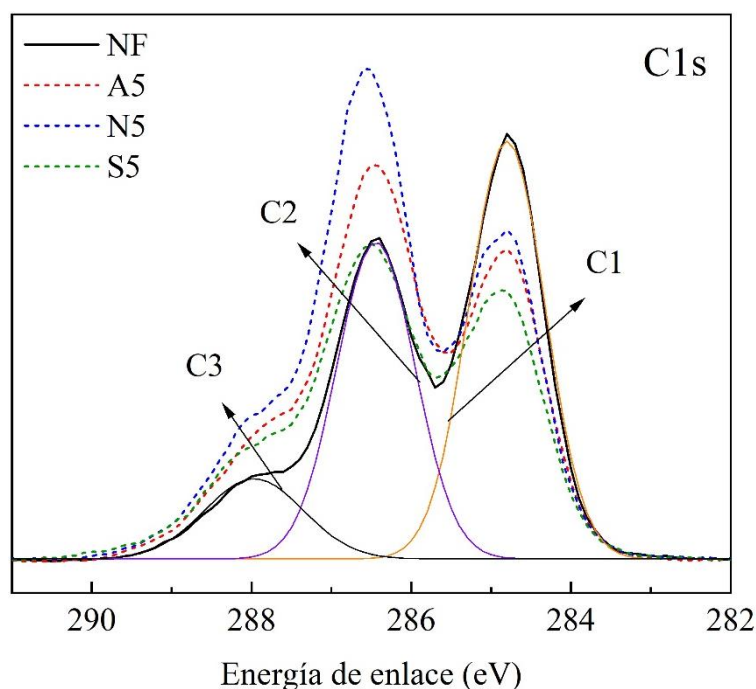


Figura 23. Espectros XPS de C1s del tejido no-funcionalizado y de los tejidos funcionalizados con CuO_x más enjuagues y neutralizado (etapa de procesos posteriores).

La Figura 24 muestra el espectro XPS de las regiones Cu 2p, del tejido no-funcionalizado y de los tejidos obtenidos durante y después de la funcionalización con CuO_x, usando 2% s.m.t de acetato, nitrato y sulfato de cobre. El nivel de energía Cu 2p se descompone en picos dobletes de Cu 2p_{1/2} y Cu 2p_{3/2} y, picos satélites (Sat) (Tharwat I. Shaheen, Fouda, & Salem, 2021; B. K. Singh et al., 2020), los cuales se pueden apreciar en todas las muestras analizadas, excepto en el tejido NF.

En la Figura 24(a) se observa que el pico Cu 2p_{3/2} de las muestras obtenidas después de la etapa de agotamiento primario se pueden deconvolucionar en dos contribuciones. Una de las contribuciones aparece alrededor de 933,4; 933,0 y 932,8 eV para A1, N1 y S1, respectivamente, asignadas al Cu⁺¹ (Jurado-López et al., 2017; Tharwat I. Shaheen, Fouda, & Salem, 2021). La otra contribución está cercano a 934,9 eV para A1; 936,4 eV para N1 y 934,0 eV para S1, y es asociada al Cu⁺² (Jurado-López et al., 2017; Tharwat I. Shaheen, Fouda, & Salem, 2021; Siddiqui et al., 2020). El doblete Cu 2p_{1/2} mostrado en el espectro, también se puede descomponer en dos contribuciones a 952,4 (A1); 952,5 (N1 y S1) y 954,1 (A1, S1); 954,0 (N1) que se asignan a las especies Cu⁺¹ y Cu⁺², respectivamente (Tharwat I. Shaheen, Fouda, & Salem, 2021; B. K. Singh et al., 2020). La especie Cu⁺² posee pico satélite, en tanto que Cu⁺¹ o Cu⁰ no lo tiene (Faraldos & Goberna, 2011). En la estructura multiplete entre 940 a 945 eV para el Cu 2p_{3/2} Sat. y en torno de 962 eV para el Cu 2p_{1/2} Sat., corresponden a los picos satélites del Cu⁺² (Errokh et al., 2016; Tharwat I. Shaheen, Fouda, & Salem, 2021; B. K. Singh et al., 2020; W. Yang et al., 2016). Por lo tanto, la presencia de estos picos satélite indica que la especie de cobre inmovilizado en la superficie del algodón es Cu⁺², esta afirmación estaría relacionado a los iones de cobre con dos cargas positivas, provenientes de la disolución de las sales de cobre en agua. Por otro lado, se esperaba sólo la presencia de Cu⁺² al culminar la etapa de agotamiento primario, sin embargo, en los espectros se observó también Cu⁺¹.

Los materiales textiles tienen gran variedad de impurezas después de su fabricación, las fibras naturales como el algodón, lino, lana, seda y otras heredan impurezas naturales (M. Clark, 2011a). En el proceso de fabricación de telas se producen impurezas cuando se añaden aceites, aprestos y otras materias para tejer fácilmente el producto (M. Clark, 2011a; Gandhi, 2020). Cabe mencionar también que, los materiales textiles se pueden contaminar ocasionalmente durante su producción (M. Clark, 2011a). Todas las impurezas adquiridas, materias extrañas, aceites, grasas, ceras, materias colorantes naturales e impurezas adventicias presentes en los textiles se deben eliminar para conseguir buen teñido o

estampado, esto mediante procesos previos como: (a) limpieza, donde gran parte de materias extrañas e impurezas se quitan por medios físicos o químicos en los procesos de desengomado y/o descrudado; y (b) blanqueo, en el cual se destruye trazas de colorantes de forma química, de tal modo que se mejora ópticamente la blancura de los textiles (M. Clark, 2011a; Nawab, 2016; Salem, 2010). En nuestro caso, para lograr una buena funcionalización con CuO_x , el tejido utilizado en este estudio también fue sometido a un proceso de blanqueo usando soda cáustica, peróxido de hidrógeno y otros productos como humectante, estabilizador, dispersante y detergente, que después de su aplicación fueron enjuagados con agua.

En el trabajo de Mitchell *et al.* (2005), compararon espectros XPS de C1s en la intensidad espectral de 285,0 eV de un algodón blanqueado y uno descrudado; encontraron poca diferencia entre ambos espectros, específicamente en la región del C1 (C-C/C-H) lo que les sugirió la existencia de una fuerte sustantividad de algún material orgánico a la fibra de algodón, con ello demostraron que después del proceso de descrude y blanqueo, todavía hay residuos de material no celulósico en la superficie de las fibras de algodón, siendo el material no celulósico una mezcla compleja de alcoholes, ésteres, ácidos grasos, alcanos y glicéridos (Mitchell *et al.*, 2005). Por consiguiente, en concordancia con los autores Mitchell *et al.* puede que en el tejido plano empleado en la presente investigación, haya residuos no celulósicos y/o remanentes de los productos químicos del proceso de blanqueo que se comporten como agentes reductores, es decir, como una sustancia que hace posible que otra sustancia se reduzca (Petrucci *et al.*, 2011), es por ello que, en el espectro de la Figura 24(a) se observó contribuciones asignadas al Cu^{+1} que podría estar asociado a la reducción del Cu^{+2} en la etapa de agotamiento primario.

Los espectros Cu 2p de los tejidos extraídos después de la adición del NaOH, incremento de temperatura a 90°C y enfriamiento a 70°C son presentados en la Figura 24(b). Se observa en la región de 931 a 938 eV, que las muestras A4, N4 y S4 exhibieron contribuciones alrededor de 932,7; 933,4 y 932,9 eV, respectivamente, que pueden ser asignados a Cu(I) 2p_{3/2} (B. K. Singh *et al.*, 2020); y contribuciones cercanos a 934, 2; 934,1 y 934,8 eV, en su orden respectivo, que podrían corresponder a Cu(II) 2p_{3/2} (Biesinger, 2017; Tharwat I. Shaheen, Fouda, & Salem, 2021). Además de ello, los espectros presentaron picos a energías de enlace de 952,7 eV para A4 y N4 y 952,8 eV para S4, que podrían ser asignados a Cu(I) 2p_{1/2} (B. K. Singh *et al.*, 2020), también los espectros mostraron otras energías de enlace a 953,8 (A4); 954,7 (N4) y 954,6 (S4) que pueden corresponder al Cu(II) 2p_{1/2} (B. K. Singh

et al., 2020). Asimismo, se puede ver que los picos satélites que están entre las regiones de energías de enlace de 940-944 eV y 960-965 eV incrementaron en intensidad en comparación con los picos satélites de las muestras A1, N1 y S1, esto indica que el Cu^{+2} no sólo está en forma de CuO sino también en forma de $\text{Cu}(\text{OH})_2$ (Mongiовí et al., 2022). Los iones OH^- provenientes de la ionización del NaOH añadido en la etapa de agotamiento secundario, pueden remover iones H de algunas de las moléculas de agua del complejo cobre-algodón probablemente formado en la etapa de agotamiento primario (Chemguide, 2015), el cual fue propuesto en la discusión de la Figura 21. Con la remoción de H se produciría $\text{Cu}(\text{OH})_2$ en el tejido y luego del incremento de la temperatura a 90°C por 20 min el $\text{Cu}(\text{OH})_2$ pasaría a ser CuO , el cual parcialmente se reduce a Cu_2O . Por lo tanto, en la superficie de las muestras A4, N4 y S4 existe mezcla de óxidos de cobre y remanentes de $\text{Cu}(\text{OH})_2$.

En la Figura 24(c) se aprecia los espectros XPS de las muestras A5, N5 y S5 que fueron obtenidas luego de los procesos posteriores de enjuague y neutralizado. Se puede ver que los picos dobletes del Cu 2p continúan en estas muestras. Para el Cu^{+1} se encontraron picos entre 932,7 a 933,1 eV que pueden ser asignados a Cu 2p_{3/2} y picos entre 952,2 a 952,6 eV para Cu 2p_{1/2} (Errokh et al., 2016; B. K. Singh et al., 2020). Para el caso de Cu^{+2} , los picos vistos entre 934,1-943,9 eV y 953,8-954,6 eV podrían corresponder a Cu 2p_{3/2} y Cu 2p_{1/2}, respectivamente (Errokh et al., 2016; B. K. Singh et al., 2020). Por otro lado, los picos satélites entre las energías de enlace de 940 a 945 eV disminuyen en intensidad para las tres muestras analizadas y, el cercano a 962,2 eV prácticamente desaparece para N5 y S5. Estos comportamientos pueden estar relacionados a la eliminación del $\text{Cu}(\text{OH})_2$ remanente en la superficie del tejido durante los enjuagues en caliente y frío y neutralizado. A partir de los resultados de XPS en la región Cu 2p, se puede concluir que, después del proceso de funcionalización utilizando diferentes sales de acetato, nitrato y sulfato de cobre, el tejido de algodón presentó picos asignados a los iones Cu^{+2} de la fase CuO y Cu^{+1} de la fase Cu_2O .

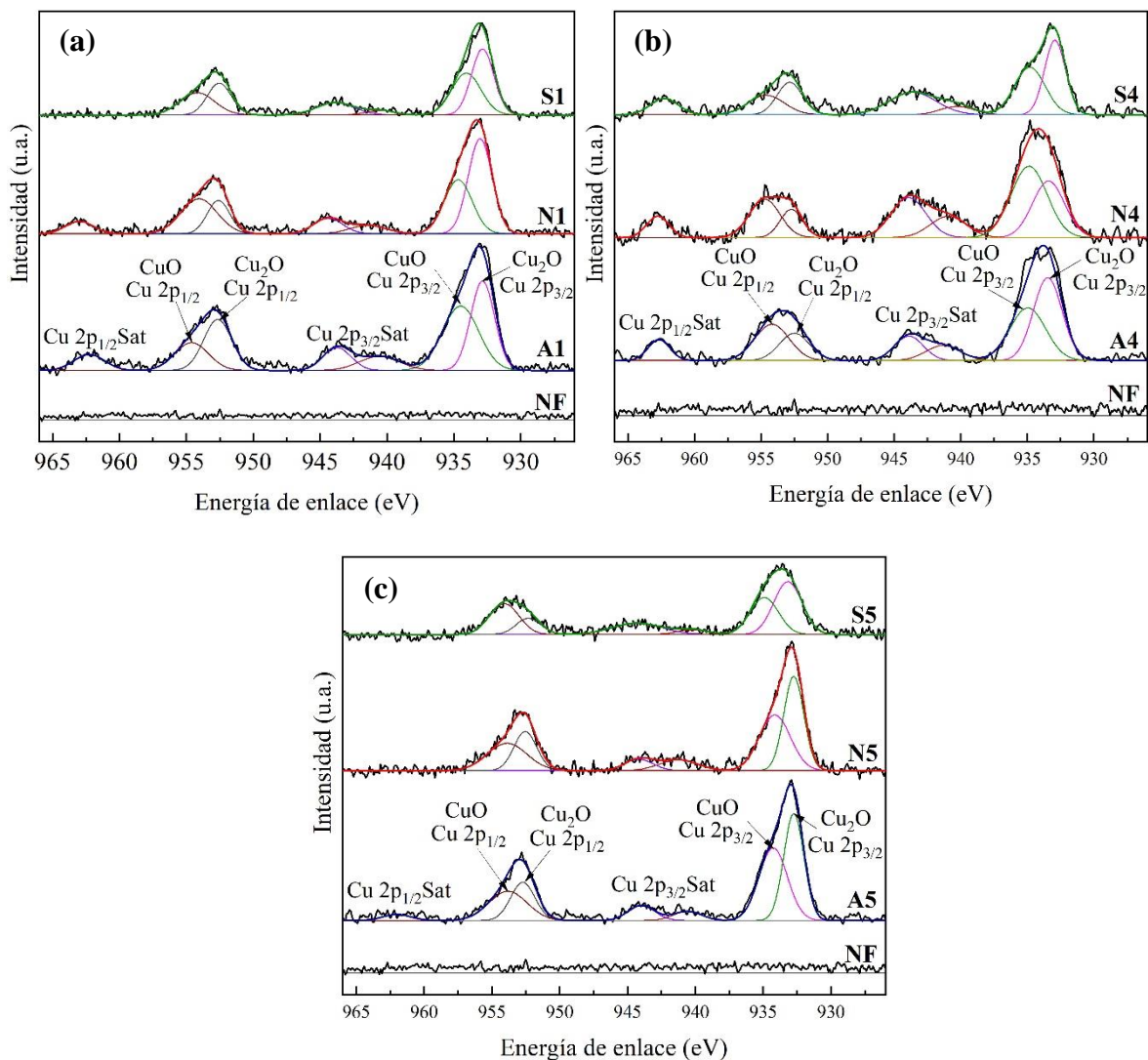


Figura 24. Espectros XPS de picos Cu 2p del tejido no-funcionalizado y de tejidos: a 25°C con sal de cobre (a); después de añadir NaOH, incremento de temperatura a 90°C y enfriamiento a 70°C (b); y funcionalizados con CuO_x más enjuagues y neutralizado.

Para las siguientes caracterizaciones por espectrometría de masas de iones secundarios en el tiempo de vuelo (TOF-SIMS) y microscopía electrónica de barrido (MEB) fueron seleccionadas las muestras A5, N5 y S5, las cuales son el producto final del proceso de funcionalización del tejido de algodón con CuO_x a partir de las sales acetato, nitrato y sulfato de cobre.

4.3.3. TOF-SIMS

La Figura 25 muestra los espectros de masas de iones positivos de TOF-SIMS del tejido no-funcionalizado y de los tejidos funcionalizados con CuO_x luego de los procesos

posteriores de enjuague y neutralizado (A5, N5 y S5). En la Figura 25(a) se observa que los espectros de masas del tejido NF y de las muestras A5, N5 y S5 son característicos de la celulosa (Kalaskar et al., 2010; Mitchell et al., 2005). En la Figura 25(b) se puede apreciar claramente que las muestra A5, N5 y S5 presentaron una señal a m/z 62,929 atribuida a la presencia de Cu (Chauhan et al., 2019; Smith et al., 2018), cuya intensidad fue diferente para cada muestra de tejido. Esta señal no fue detectada en el tejido NF, por consiguiente, con este resultado se puede demostrar que el Cu está presente y adherido a la superficie del algodón. En otras regiones del espectro de iones secundarios como los rangos m/z de 92–93 y 106–107, tal como se muestra en la Figura 25(c), se identificaron fragmentos orgánicos de Cu, lo cual implica una gran probabilidad de que haya injertos de Cu en el tejido de algodón funcionalizado, corroborando con esto los resultados de XPS discutidos en la sección 4.3.2, no obstante, la formación de iones secundarios de los tejidos funcionalizados con CuO_x es muy complicada y debe ser estudiada con más detalle.

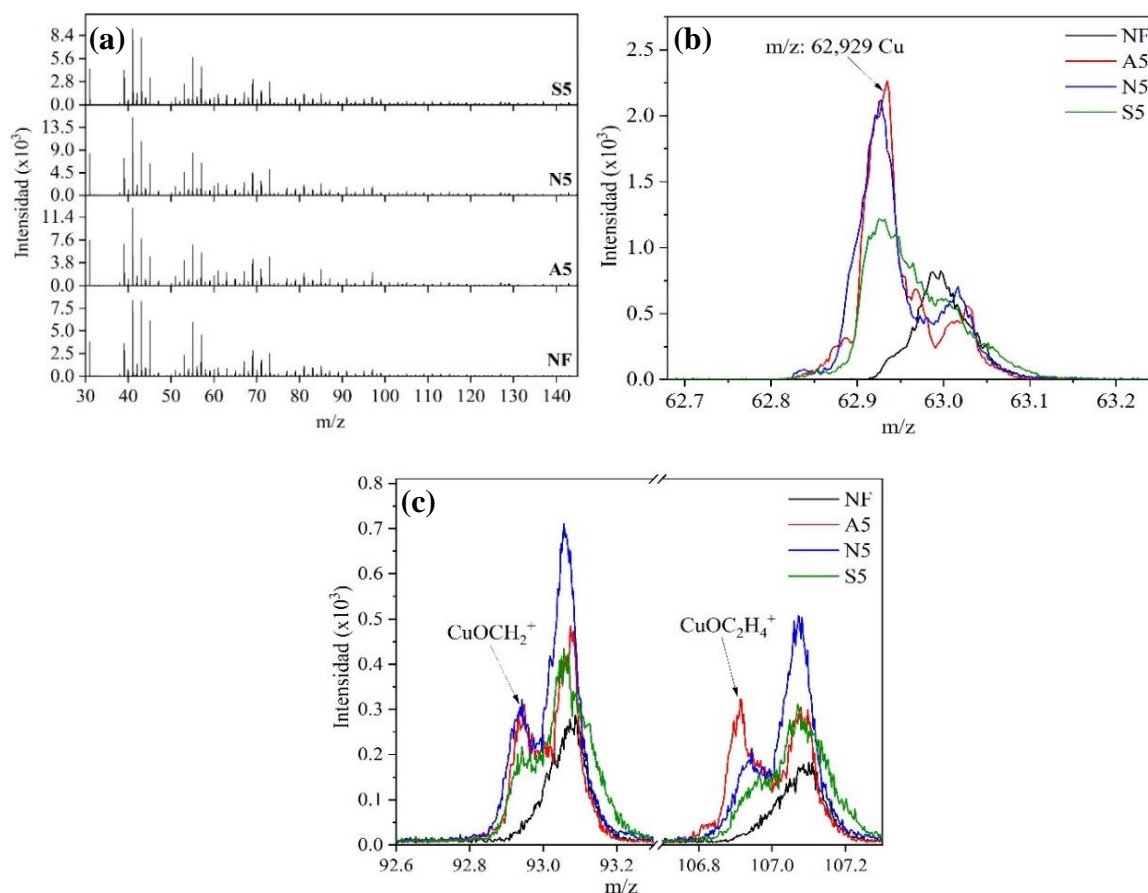


Figura 25. Espectro TOF-SIMS de iones positivos del tejido no-funcionalizado y de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizadas con CuO_x en los rangos m/z de: (a) 30 – 140; (b) 62,7 – 63,2 y; (c) 92,6 – 107,2.

4.3.4. MEB

La morfología del tejido no-funcionalizado y de los tejidos funcionalizados con CuO_x luego de los procesos posteriores de enjuague y neutralizado (A5, N5 y S5) son mostradas en las figuras 26 y 27.

La Figura 26 está relacionada con la fibra de algodón no funcionalizada. La Figura 26(a) presenta la morfología intrínseca del algodón, donde se puede observar que la fibra tiene una superficie limpia con surcos paralelos que parecen pliegues (Gordon & Hsieh, 2007). La pared secundaria de la fibra de algodón está compuesta por microfibrillas de celulosa en diferentes orientaciones (Martinez-Sanz et al., 2017). En la Figura 26(b) se aprecian estas microfibrillas como hilos entrecruzados en la superficie del algodón, asimismo, en esta figura se puede ver con mayor detalle los pliegues.

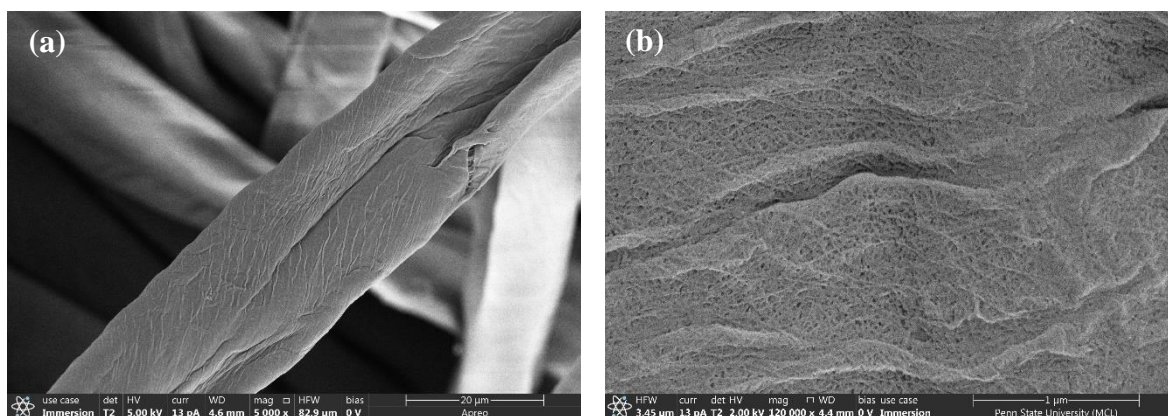


Figura 26. Micrografía de MEB del tejido no funcionalizado en magnificaciones: (a) 5kX; (b) 120kX.

Las micrografías electrónicas de barrido de las muestras A5, N5 y S5 funcionalizadas con CuO_x son mostrados en la Figura 27. A la magnificación de 25kX y opuesto a las micrografías del tejido no funcionalizado (Figura 26) se puede ver que los CuO_x aparecen como partículas claras distribuidas de manera heterogénea sobre la superficie de la fibra de algodón de todas las muestras obtenidas a partir de las sales de acetato, nitrato y sulfato de cobre (Figuras 27 (a), (c) y (e)). Cuando las micrografías fueron ampliadas a 120xK se percibió que los CuO_x se aglomeraron en formas irregulares y de distintos tamaños, además de ello, se localizaron por entre los pliegues de la fibra de algodón (Figuras 27 (b), (d) y (f)).

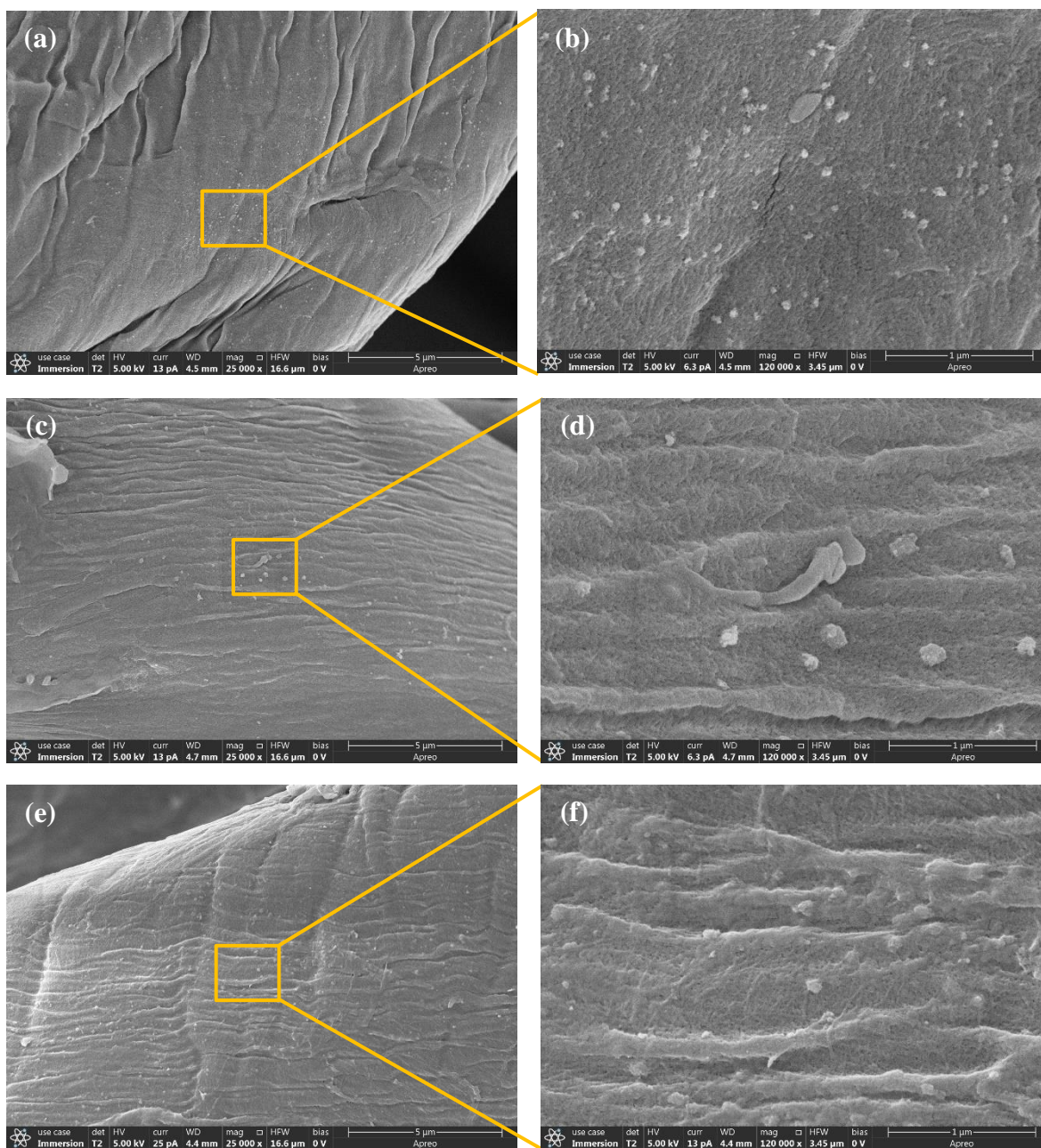


Figura 27. Micrografías de MEB de los tejidos funcionalizados con CuO_x : tejido A5 (a,b); tejido N5 (c,d) y tejido S5 (e,f) en magnificaciones de 25kX y 120kX.

4.4. Evaluación microbiológica

Los resultados del porcentaje de reducción bacteriana del tejido no-funcionalizado y de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO_x frente a bacterias Gram-positivas, evaluados según la norma técnica ASTM E2149:2013, se encuentran en la Figura 28. El tejido NF presentó una reducción del crecimiento bacteriano del 41,8% para la cepa

Escherichia coli (ATCC 25922) y 20,1% para *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 10145), estos valores fueron menores que los porcentajes encontrados en los tejidos funcionalizados con CuO_x. Las muestras A5, N5 y S5 inhibieron el crecimiento de las dos bacterias analizadas en un porcentaje de reducción del 99,99%.

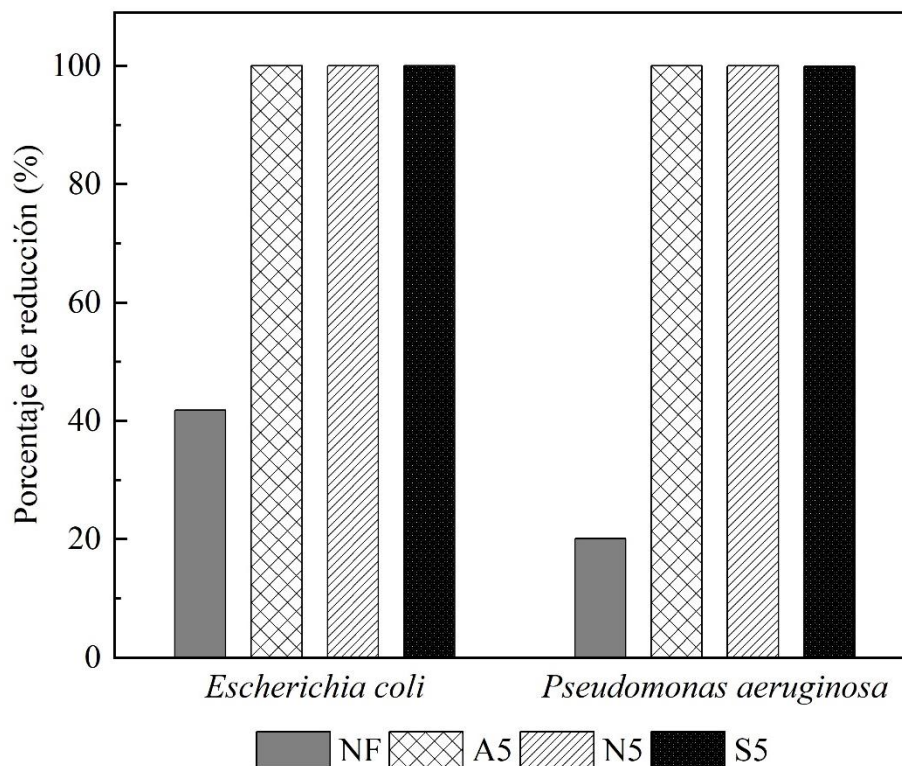


Figura 28. Resultados del porcentaje de reducción bacteriana para *Escherichia coli* (ATCC 25922) y *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 10145) del tejido no-funcionalizado y de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO_x, evaluados según norma ASTM E2149:2013.

En la Figura 29 se puede observar el conteo bacteriano en placas Petri de las cepas *Escherichia coli* (ATCC 25922) y *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 10145) para el tejido no funcionalizado y tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO_x. En las Figuras 29 (a-1) y 29(b-1) claramente se visualiza presencia de colonias luego de 1 h de contacto con el tejido NF, los recuentos bacterianos fueron de 189×10^4 y 376×10^4 UFC/ml para *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*, respectivamente. Las Figuras 29(a-2) y (b-2) representan las placas que fueron sembradas con 100 μ l de la solución bacteriana en contacto con las muestras A5, N5 y S5. Se puede apreciar que no hubo desarrollo de las dos cepas bacterianas evaluadas, por lo tanto, los tejidos funcionalizados con CuO_x ofrecen buena propiedad antibacteriana.

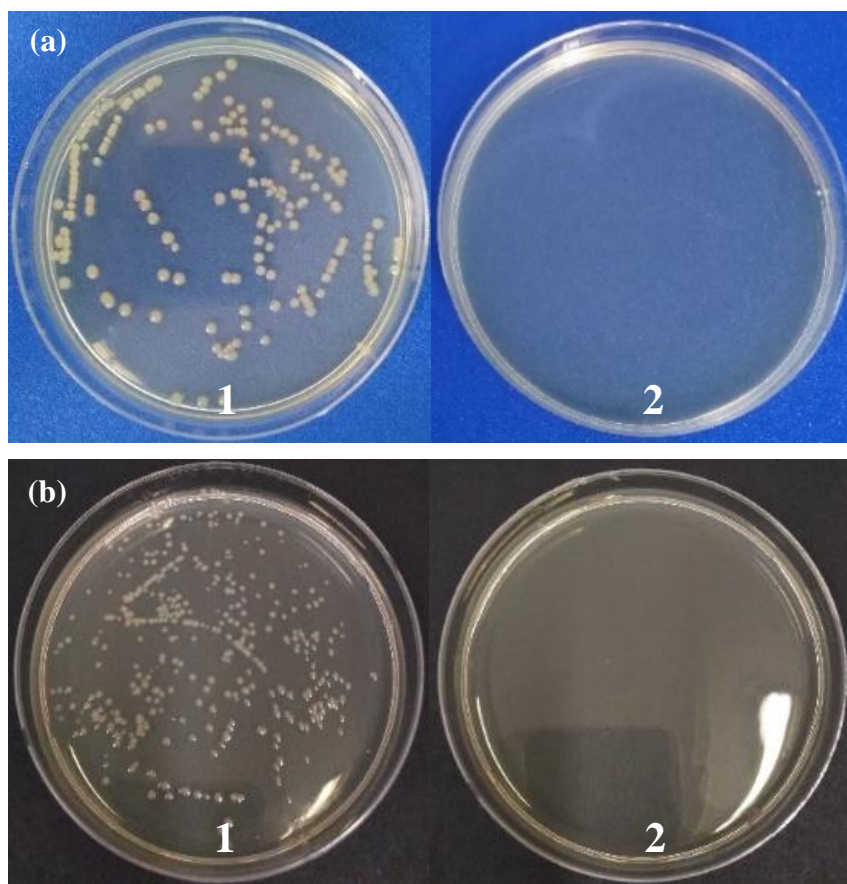
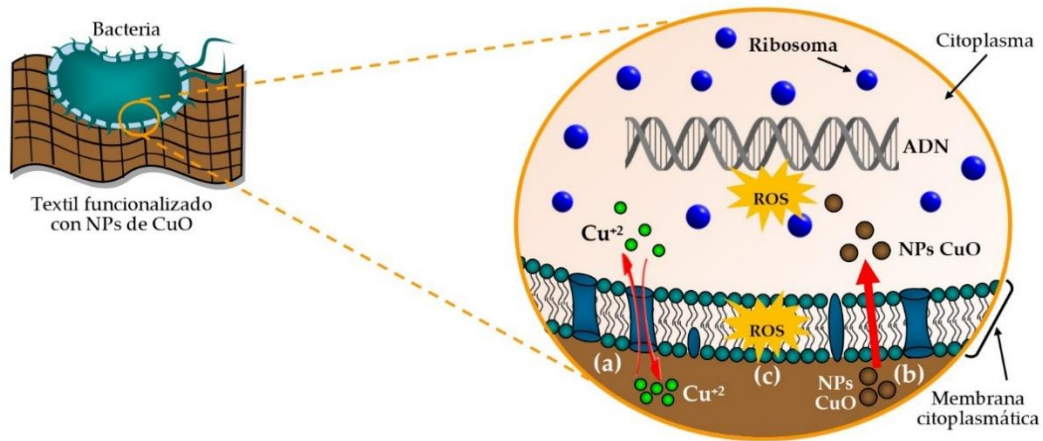


Figura 29. Resultados de las placas para: (a) *Escherichia coli* (ATCC 25922) y (b) *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 10145). En ambos casos fotografía (1) tejido no funcionalizado y (2) tejidos funcionalizados con CuO_x a partir de las sales de acetato, nitrato y sulfato de cobre.

El mecanismo de la actividad antimicrobiana de los materiales textiles funcionalizados con CuO_x , específicamente con nanopartículas (NPs) de CuO frente a las bacterias Gram-positivas como a Gram-negativas aún no se ha investigado por completo, es por ello que dentro de algunos estudios publicados se proponen que el mecanismo inicia con la adsorción de las bacterias en la superficie del textil (Palza, 2015; Rezaie, Montazer, & Rad, 2018). En esta condición la actividad antibacteriana puede estar atribuida con tres mecanismos, los cuales son: la liberación de iones cobre, contacto directo de las NPs de CuO con la bacteria y/o producción de especies reactivas de oxígeno (ROS - *Reactive Oxygen Species*) (Radetić & Marković, 2019; Stanić & Tanasković, 2020; Tamayo et al., 2016). En la Figura 30 se propone un esquema de la actividad antimicrobiana de las NPs de CuO por los tres mecanismos mencionados líneas arriba.



Fuente: Adaptado de L. E. Román *et al.* (2020)

Figura 30. Diagrama de los mecanismos de la actividad antimicrobiana de materiales textiles funcionalizados con NPs de CuO: (a) liberación de iones de cobre; (b) contacto de las NPs de CuO con la bacteria y; (c) especies reactivas de oxígeno.

Para el caso de la liberación de iones cobre (Cu^{+2}), esta puede ser originada por la disolución de las NPs de CuO en presencia de agua y oxígeno (Hasheminya *et al.*, 2018; Markovic *et al.*, 2018; Palza, 2015; Shankar, Wang, & Rhim, 2017). La ligera solubilidad del CuO podría estar relacionada con su baja constante de producto de solubilidad ($K_{sp} \sim 10^{-20}$ a 25°C), la cual indica que en solución acuosa se tiene una mínima concentración de Cu^{+2} (Gedanken *et al.*, 2011; Perelshtein *et al.*, 2013; Yoosefi, Wang, & Xu, 2015). A parte de ello, el agua necesaria para generar la disolución del CuO podría provenir del medio que rodea a la bacteria (Palza, 2015; Rezaie, Montazer, & Rad, 2018). Se debe tener en cuenta que los materiales polares como el algodón y los no polares como polietileno o polipropileno permiten la difusión de moléculas de agua a través de sus matrices poliméricas y esta difusión aumenta con la polaridad del material (Palza, 2015; Tamayo *et al.*, 2016). Por lo tanto, las moléculas de agua provenientes del medio bacteriano al entrar en contacto con el material textil podrían difundirse e interactuar con las NPs de CuO que están en la superficie o incrustadas dentro de la matriz polimérica del material para luego generar su disolución y por consiguiente la liberación de iones Cu^{+2} (Shankar, Wang, & Rhim, 2017). La característica aniónica de la envoltura celular bacteriana le permite interactuar a través de fuerzas electrostáticas con moléculas extracelulares y iones metálicos (Pankratova, Hederstedt, & Gorton, 2019; Thomas III & Rice, 2015). Entonces, debido a esta característica los iones de cobre liberados podrían interactuar electrostáticamente con los

componentes de la envoltura celular que son: la pared celular y membrana plasmática (Stanić & Tanasković, 2020). Esta interacción causaría la desnaturalización de las proteínas en la membrana bacteriana y produciría el efecto bacteriolítico, es decir la desintegración de la bacteria (Tamayo et al., 2016). Además, según los autores Markovic *et al.* (2018) y Shankar *et al.* (2017), los iones de cobre se unen a la membrana citoplasmática y a las proteínas responsables de los procesos metabólicos (Markovic et al., 2018; Shankar, Wang, & Rhim, 2017). En esta situación, los iones pueden entrar al citoplasma a través de las proteínas integrales o por la misma membrana citoplasmática (Markovic et al., 2018; Thomas III & Rice, 2015). Una vez dentro del citoplasma los iones de cobre pueden interactuar con el ADN de la bacteria e involucrarse en la reticulación de las cadenas del ácido nucleico, generando un desorden en las estructuras helicoidales, con ello se evita la reproducción bacteriana y su muerte celular (Hasheminya et al., 2018; Shankar, Wang, & Rhim, 2017; Stanić & Tanasković, 2020; Tamayo et al., 2016). Una posible ruta de ingreso de iones de cobre al citoplasma se muestra en la Figura 30(a).

Para comprobar que el mecanismo de la actividad antibacteriana de un material funcionalizado con NPs de CuO es debido a los iones de Cu^{+2} , los autores Yoosefi *et al.* (2015), compararon resultados de análisis microbiológicos de soluciones bacterianas obtenidas después de estar en contacto: a) con una muestra de papel de celulosa (1 cm^2) funcionalizado con NPs de CuO, y b) con iones cobre lixiviados que se produjeron luego de agitar una muestra de 1 cm^2 del papel de celulosa funcionalizado con NPs de CuO en un medio de cultivo sin bacteria (Yoosefi, Wang, & Xu, 2015). Los resultados reportados indicaron que la solución lixiviada tuvo la misma actividad antimicrobiana que la solución en contacto directo con el papel de celulosa funcionalizado con las nanopartículas. Además, los resultados validaron que la solución lixiviada era un líquido cristalino sin objetos sólidos a simple vista, y para descartar la presencia de NPs de CuO, los autores realizaron análisis de dispersión de luz dinámica (DLS, por sus siglas en inglés) y no detectaron partículas. Por lo tanto, los resultados microbiológicos y DLS confirmaron que la actividad antimicrobiana se debió principalmente a los iones de Cu^{+2} . Con relación a esta investigación, podríamos destacar el análisis microbiológico que hicieron a las partículas lixiviadas por el método de recuento en placa para confirmar que la muerte de las bacterias fue provocada por los iones cobre provenientes de la ligera disolución del CuO en agua.

Otro mecanismo de actividad antibacteriana es el contacto directo de las NP de CuO con bacterias. En este caso, las NP de CuO presentes en los materiales funcionalizados podrían

adherirse a la superficie de la bacteria por fuerzas electrostáticas e interacciones moleculares, y las NP de menos de 10 nm de diámetro podrían atravesar la pared celular bacteriana (Markovic et al., 2018; Tamayo et al., 2016). Al alcanzar la membrana citoplasmática, las NPs de CuO podrían introducirse en el citoplasma por endocitosis y difusión directa (Hou et al., 2017; Tamayo et al., 2016) (ver Figura 30(b)). Según Cossart y Helenius (2014), la endocitosis es un proceso en el que líquido, solutos, ligandos, partículas y otros son envueltos con la membrana citoplasmática para formar vesículas que quedan dentro de la célula (Cossart & Helenius, 2014). Basado en esta definición, las NPs de CuO podrían ser englobadas por la membrana plasmática y formar una vesícula que posteriormente se fusione con los componentes internos en el citoplasma. Por el contrario, la forma de introducción al citoplasma por difusión directa de las NPs de CuO puede estar relacionada con la adherencia de estas nanopartículas a la membrana citoplasmática, y simultáneamente con la generación de ROS en su superficie, que provoca un aumento de la permeabilidad celular, lo que conduce al transporte descontrolado de nanopartículas al interior de la célula a través de esta membrana (Giannousi, Pantazaki, & Dendrinou-Samara, 2017). La difusión directa también podría deberse a la preferencia de las NPs de CuO hacia el grupo lipídico (fosfolípidos) de la cabeza o la cola, componente de la membrana citoplasmática, y esto está relacionado con su naturaleza hidrofóbica o hidrofílica (Tamayo et al., 2016). Finalmente, las NPs al estar en el citoplasma se pueden unir a las moléculas del ADN originando la desorganización de su estructura helicoidal, inhibición de la replicación del ADN, desnaturalización de proteínas y consecuentemente muerte celular (Giannousi, Pantazaki, & Dendrinou-Samara, 2017; Hou et al., 2017). A parte de ello y paralelamente con este mecanismo, las NPs de CuO podrían liberar iones y desencadenar los efectos asociados con ellos los cuales fueron discutidos anteriormente.

Entre los mecanismos de la actividad antimicrobiana de las NPs de CuO presentes en el material textil y que están en contacto con la bacteria, se encuentran las ROS, como se muestra en la Figura 30(c). ROS son moléculas que contienen oxígeno, y representan el grupo más importante de oxidantes que incluye el radical hidroxilo (OH^\bullet), el ion superóxido ($\text{O}_2^{\bullet-}$), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), los peróxidos orgánicos y, entre otros (Bedlovicova et al., 2020; R. Li, Jia, & Trush, 2016). Las NPs de CuO y los iones Cu^{+2} inducen la generación de ROS (Applerot et al., 2012; Sedighi & Montazer, 2016; Stanić & Tanasković, 2020; Tamayo et al., 2016). Además, hay que tener en cuenta que, a escala nanométrica, se forma más ROS por unidad de peso, y debido a su exceso de producción y alteración de los

mecanismos de defensa bacterianos, se activa la muerte celular programada y se desencadena el estrés oxidativo (Giannousi, Pantazaki, & Dendrinou-Samara, 2017; Tamayo et al., 2016). Según Bedlovicova et al. (2020), el estrés oxidativo se define como un estado en el que el equilibrio entre la defensa antioxidante de la célula y los oxidantes se ve interrumpido por el efecto del exceso de oxidantes como las ROS (Bedlovicova et al., 2020). Por lo tanto, este estrés oxidativo tiene una mayor letalidad que las ROS iniciales causadas por CuO (Tamayo et al., 2016). Además de lo mencionado anteriormente, el exceso de ROS puede provocar la peroxidación de lípidos, la oxidación de proteínas y daños en el ADN y el ARN, y causar la muerte bacteriana (Brynildsen et al., 2013; Shahidi et al., 2017; Stanić & Tanasković, 2020).

4.5. Pruebas de resistencia al lavado del textil

Tras el proceso de funcionalización de los tejidos con CuO_x fue realizado pruebas de resistencia a ciclos de lavados domésticos usando el procedimiento de la norma ISO 105-C06:2010. La Figura 31 muestra el efecto del lavado sobre las propiedades ópticas de los tejidos de algodón funcionalizados con CuO_x (muestras A5, N5 y S5). En la variación porcentual de L* con respecto al algodón funcionalizado y sin lavado (Figura 31(a)), se puede observar que para la muestra A5 después de todos los ciclos de lavado hubo una variación que osciló entre +0,38% y -1,07%. Para la muestra N5 la variación se mantuvo relativamente constante, obteniéndose un valor máximo de +0,61%. En la muestra S5, el L* aumentó conforme se incrementaba los lavados, esto indica que la blancura o claridad o pérdida de intensidad de la tela fue mayor. Según Nam *et al.* (2020), las nanopartículas de metales pueden sintetizarse en la parte externa e interna de una fibra de algodón, y debido a las fuerzas de fricción existentes en los lavados, las nanopartículas ubicadas en la superficie de la fibra son vulnerables a ser liberados, mientras que las sintetizadas dentro de la fibra pueden ser más resistentes a los lavados sucesivos (S. Nam et al., 2020). Con respecto a la literatura citada, el aumento de la blancura de la muestra S5 probablemente está relacionada a la disminución de la cantidad de CuO_x formadas en la superficie de la fibra, ello producido por la fricción de las esferas de acero al tejido al momento de los lavados. Como se mostrará más adelante, esta disminución será consistente con los resultados de los análisis elementales.

En términos de enrojecimiento (coordenada a*) y amarillez (coordenada b*) mostrados en la Figura 31(b), se observaron que con referencia al tejido funcionalizado con CuO_x y sin

lavados, el porcentaje de variación a^* de la muestra A5, con las primeras 5 lavadas, disminuyó aproximadamente 7%, luego se incrementó de forma gradual con las lavadas posteriores. El mayor porcentaje de variación fue de 42,9% para 25 lavadas. Esta última tendencia del aumento del porcentaje de variación se produce cuando se tiene más ciclos de lavados, esto también se pudo apreciar en la muestra N5; excepto en el lavado número 15 donde el incremento de a^* fue en menor proporción (16,6%) con respecto al lavado 10 cuyo porcentaje fue de 24,6%. En la muestra S5, los porcentajes de variación a^* disminuyeron para todos los lavados, esto puede estar relacionado con la pérdida de CuO_x visto en sus resultados de variación porcentual de L^* .

Por otro lado, el b^* de la muestra A5 fue cayendo hasta el lavado 10, su porcentaje de variación fue de -4,3%, a partir de aquí se observó un incremento progresivo desde 5,7% hasta 8,3% para 15 y 25 lavadas, respectivamente. Para las muestras N5 y S5, el valor de b^* disminuyó en promedio -12,5% y -11,2%, respectivamente, estos resultados se mantuvieron relativamente constante después de cada ciclo de lavado. Finalmente, a pesar de estas diferentes variaciones de porcentaje, tanto en a^* como en b^* , después de los lavados para las tres muestras A5, N5 y S5, el tono de los tejidos funcionalizados siguieron siendo pardo-rojizo, indicando así que aún hay presencia de CuO_x .

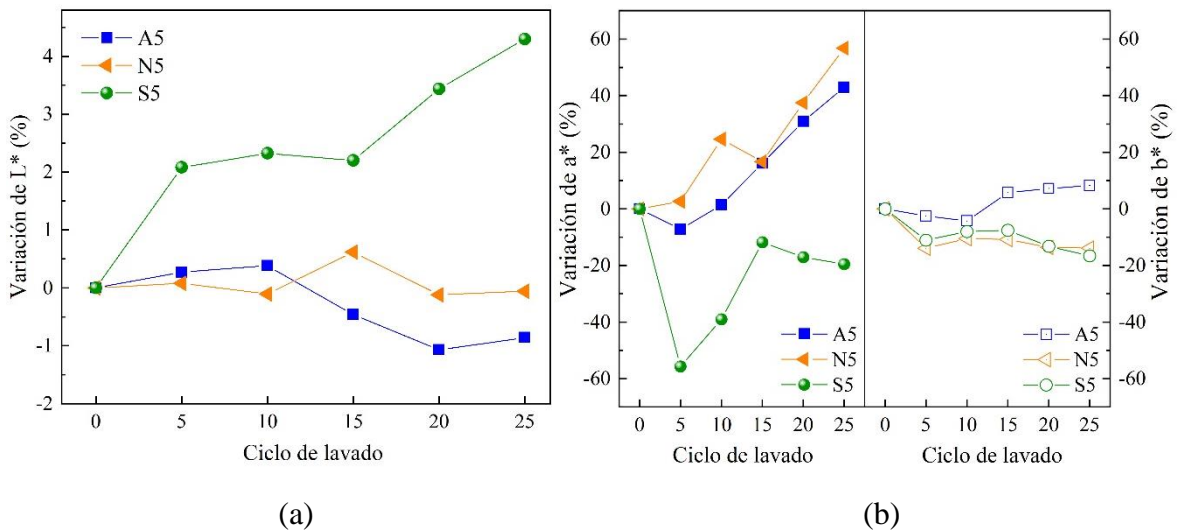


Figura 31. Variaciones porcentuales en las coordenadas de color CIE $L^*a^*b^*$. (a) L^* y (b) a^* y b^* de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO_x en función de ciclos de lavado doméstico.

La Figura 32 presenta los resultados de la cantidad de Cu de las muestras funcionalizadas con CuO_x (A5, N5 y S5), antes y después de 5, 15 y 25 lavados. Se puede observar que todas las muestras de tejidos presentaron una tendencia creciente en liberación de cantidades de Cu luego de cada cinco ciclos de lavados. En la Figura 32 también se percibe que después de 5 lavados, la cantidad de Cu disminuyó en 8,3; 23,7 y 27,1% para las muestras A5, N5 y S5, respectivamente, esta pérdida puede estar relacionada a la eliminación de los CuO_x que se situaban en la superficie del tejido o al desprendimiento de los óxidos que estaban débilmente unidos a la fibra del algodón (Geranio, Heuberger, & Nowack, 2009; Limpiteeprakan et al., 2016). Tras 15 lavados, el porcentaje de pérdida de Cu en los tejidos de algodón aumentó a 17,9% para A5; 35,2% para N5 y 38,1% para S5. Asimismo, después de 25 lavados, la pérdida de Cu siguió incrementándose y alcanzó valores de 26,4; 45,2 y 48,5% para A5, N5 y S5, en su orden respectivo. Estas pérdidas en las cantidades de Cu de los tejidos funcionalizados con CuO_x , probablemente están relacionadas al estrés mecánico creado por la agitación con las esferas de acero durante la prueba de lavado. Por otro lado, a pesar de la continua disminución de Cu con el transcurso de los 25 lavados, se puede ver que la muestra A5 funcionalizada con CuO_x a partir de acetato de cobre mostró una menor pérdida de Cu en comparación con las muestras obtenidas con nitrato (N5) y sulfato (S5) de cobre, esto puede ser debido a su afinidad química por la celulosa del algodón, tal como se discutió en la sección 4.3.1.

Un estudio realizado por Limpiteeprakan *et al.* (2016) informó que productos comerciales textiles como el asiento de auto y el body enterizo aplicados con nanopartículas de plata, después de ser sometidos a 20 ciclos de lavados con agua, perdieron más del 50% de su contenido de plata (Limpiteeprakan et al., 2016). Con relación a esta investigación y asumiendo que el cobre tendría un comportamiento similar a la plata en los textiles comerciales, podríamos decir que, el porcentaje de cobre perdido en las muestras A5, N5 y S5 después de 25 lavados es menor que la pérdida de partículas de productos comerciales.

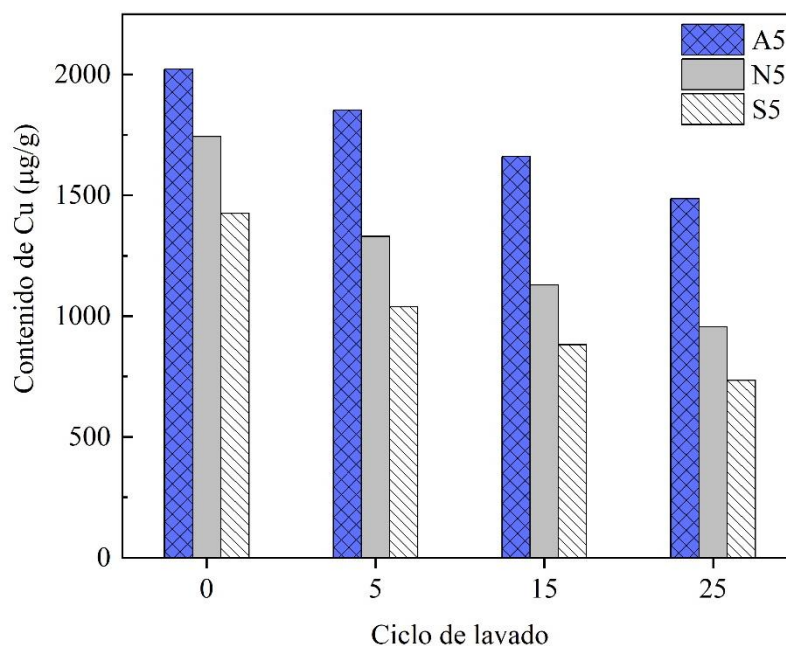


Figura 32. Contenidos de Cu en tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO_x antes y después de 5, 15 y 25 ciclos de lavados obtenidos por ICP-MS.

Debido a la pérdida de partículas de Cu en el transcurso de los ciclos de lavados, no se continuaron las caracterizaciones de XPS, TOF-SIMS y MEB de los tejidos A5, N5 y S5 con 25 lavados, puesto que la cantidad deficiente de CuO_x en los textiles (por debajo del 0,1% en peso), no detectaría ninguna señal espectroscópica.

La Tabla 4 presenta los porcentajes de reducción bacteriana de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO_x con 5, 15 y 25 lavadas frente a las cepas *Escherichia coli* (ATCC 25922) y *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 10145), evaluados según la norma técnica ASTM E2149:2013. Para la cepa *Escherichia coli*, las muestras A5, N5 y S5 después de 5, 15 y 25 lavadas inhibieron el crecimiento de esta bacteria en más del 99%, con excepción de las muestras S5 y N5 con 15 y 25 lavadas, respectivamente. El porcentaje de reducción bacteriana de la muestra S5-15 lavadas varió ligeramente, su valor final fue de 98,56%. En el caso de la muestra N5-25 lavadas alcanzó un porcentaje mínimo de 93,27%. Esta disminución de su propiedad antimicrobiana puede estar relacionado con la con la disminución de la cantidad de Cu en la superficie del tejido producido por la constante fricción entre las esferas de acero y el tejido durante los ciclos de lavados. Para la cepa *Pseudomonas aeruginosa* todas las muestras A5, N5 y S5 con 5, 15 y 25 lavadas presentaron porcentaje de reducción bacteriana mayor al 99%. A partir de estos resultados se percibe

que, a pesar del continuo aumento en la pérdida de la cantidad de Cu con el incremento de las lavadas, tal como fue visto en los resultados de ICP de los tejidos lavados (Figura 32), las muestras A5, N5 y S5 con 5, 15 y 25 lavados continúan inhibiendo el crecimiento de bacterias Gram-positivas.

Tabla 4. Resultados del porcentaje de reducción bacteriana para *Escherichia coli* (ATCC 25922) y *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 10145) de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO_x después de 5, 15 y 25 ciclos de lavados, evaluados según norma ASTM E2149:2013.

Ciclos de lavado	Bacteria					
	<i>Escherichia coli</i>			<i>Pseudomonas aeruginosa</i>		
	A5	N5	S5	A5	N5	S5
5L	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9	99,9
15L	99,9	99,9	98,5	99,7	99,9	99,9
25L	99,9	93,2	99,4	99,9	99,9	99,9

4.6. Control de calidad textil

Los resultados del control de calidad de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO_x serán mostrados en las secciones 4.6.1 y 4.6.2.

4.6.1. Propiedades físicas

Las pruebas físicas fueron realizadas para determinar y evaluar posibles cambios del tejido de algodón después del proceso de funcionalización con CuO_x.

4.6.1.1. Ligamento del tejido

En la Figura 33 se muestra la estructura del tejido empleado en la investigación. Es un tejido tipo plano, este tejido se produce por el entrecruzamiento perpendicular de hilos de urdimbre (hilos verticales) y trama (hilos horizontales), la forma como se entrecruzan ambos hilos da origen a un patrón ordenado y repetitivo denominado ligamento que puede ser tafetán, sarga o satén (Gandhi, 2020). En nuestro caso, se puede observar con claridad que el ligamento (cuadro azul en Figura 33) de los tejidos con y sin funcionalización de CuO_x es una sarga 2/1, esto indica que hay 2 hilos de urdimbre sobre 1 hilo de trama.

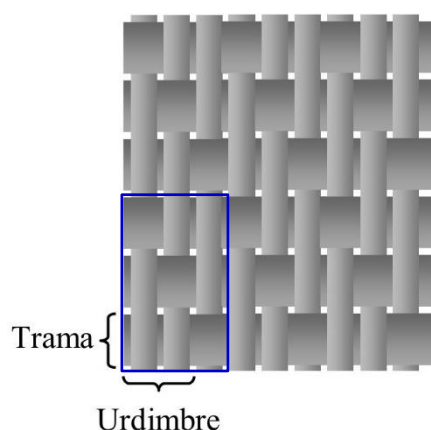


Figura 33. Esquema del ligamento sarga 2/1 del tejido no-funcionalizado y de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO_x , según norma ABNT NBR 12996:1993.

4.6.1.2. Título del hilo extraído del tejido

Los resultados del título de los hilos del tejido no-funcionalizado y de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO_x son presentados en la Tabla 5. Se aprecia una mínima diferencia de títulos entre los hilos, tanto en el sentido de urdimbre como de en el sentido de trama, antes y después de la funcionalización. Con referencia al tejido NF hay una diferencia que oscila entre 0,7 a 0,8 para urdimbre y entre -0,1 a 0,1 para trama de las muestras A5, N5 y S5. Por tanto, se concluye que los CuO_x no modifican los títulos de los hilos que componen el tejido.

Tabla 5. Título del hilo en sistema inglés (Ne) del tejido no-funcionalizado y de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO_x , según norma ISO/FDIS 7211-5:2020.

Muestras	Título (Ne)	
	Urdimbre	Trama
NF	15,9	10,1
A5	16,7	10,2
N5	16,6	10,2
S5	16,7	10,0

4.6.1.3. Densidad de hilos del tejido

La Tabla 6 muestra los resultados de la densidad de hilos/cm del tejido antes y después del proceso de funcionalización con CuO_x . Se puede verificar que la cantidad de hilos en el

sentido de la urdimbre varió entre -0,2 a 0,3. En el sentido de trama, después del proceso de funcionalización se incrementó la densidad en aproximadamente 1 hilo. Este incremento puede estar relacionado con el encogimiento típico que presenta un material de algodón cuando es sometido a procesos húmedos textiles o lavados (R. Kozłowski & Mackiewicz-Talarczyk, 2020).

Tabla 6. Densidad de hilos del tejido no-funcionalizado y de los tejidos A5, N5 y S5 funcionalizados con CuO_x, según norma ABNT NBR 10588:2015.

Muestras	N° hilos/cm	
	Urdimbre	Trama
NF	41,7	19,6
A5	42,0	21,0
N5	42,0	20,5
S5	41,5	20,6

4.6.2. Pruebas de solidez del color

Las pruebas de solidez del color se realizaron para evaluar si los agentes externos como lavado y sudor afectan las características de color de los tejidos funcionalizados con CuO_x.

4.6.2.1. Solidez al lavado

En la Tabla 7 se encuentran los resultados de la evaluación de la solidez al lavado. Se puede ver que las muestras A5, N5 y S5 funcionalizadas con CuO_x presentaron una puntuación en transferencia de color hacia el testigo de múltiples fibras DW entre valores de 4 a 5. La puntuación 4 indica que apenas hubo manchado y la puntuación 5 que no hubo manchado. Para el cambio de color, los valores obtenidos oscilaron entre 4-5, que significa un pequeño a casi nulo cambio después del proceso de lavado.

Tabla 7. Resultados de la evaluación de solidez al lavado, según norma ISO 105-C06:2010 – Prueba B1M con la E.G.T.C. y E.G.C.C.

Evaluación	Testigo multifibra DW	Muestras		
		A5	N5	S5
Transferencia de color	Diacetato	4-5	4-5	4-5
	Algodón blanqueado	4-5	4-5	4-5
	Poliamida	5	5	5
	Poliéster	4-5	4-5	4
	Acrílico	4	4-5	4-5
	Lana	4-5	5	5
Cambio de color		4-5	4-5	4-5

4.6.2.2. Solidez al sudor

Los resultados de la evaluación de la solidez al sudor se muestran en la Tabla 8. Para la muestra A5, se puede reportar que la puntuación mínima en transferencia de color hacia las fibras de diacetato y acrílico fue de valor 3, esto indica que hubo manchado. Para las muestras N5 y S5 las puntuaciones en transferencia de color estuvieron entre los valores 4 a 5, lo cual indica que apenas o casi no hubo manchado hacia fibras adyacentes. En el caso de cambio de color, en las muestras A5, N5 y S5 el valor mínimo fue 1 y máximo 2 que denotan gran y apreciable pérdida de color, respectivamente, durante la prueba de sudor.

Tabla 8. Resultados de la evaluación de solidez al sudor, según norma ISO 105-E04:2013 con la E.G.T.C. y E.G.C.C.

Evaluación	Testigo multifibra DW	Muestras		
		A5	N5	S5
Transferencia de color	Diacetato	3-4	4	4
	Algodón blanqueado	4	4-5	4-5
	Poliamida	4-5	4-5	4
	Poliéster	4-5	4	4-5
	Acrílico	3-4	4-5	4
	Lana	4	4	4-5
Cambio de color		2	1-2	1-2

CAPÍTULO V: CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

En función de los resultados obtenidos para cada objetivo propuesto en la presente investigación, se da la validación de la hipótesis general y de las hipótesis específicas.

Objetivo específico 1: Funcionalizar *in situ* tejidos de algodón con CuO_x por el método de teñido de agotamiento utilizando sales precursoras de acetato, nitrato y sulfato de cobre para obtener tejidos antimicrobianos.

- Se consiguió funcionalizar *in situ* tejidos de algodón de $296,41 \text{ g/m}^2$ con CuO_x utilizando 2% s.m.t de $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$; $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ y $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; y 0.5 g/L de NaOH, mediante el método de teñido de agotamiento, y se obtuvo tejidos antimicrobianos evaluados con la norma técnica ASTM E2149:2013.

Objetivo específico 2: Determinar la relación que existe entre las características colorimétricas, tanto del tejido no-funcionalizado como de los tejidos obtenidos durante proceso de funcionalización con CuO_x , con la presencia de cobre en los tejidos.

- Mediante la evaluación colorimétrica de los tejidos utilizando el espectrofotómetro de reflectancia SF 550 marca Datacolor y cálculo de las coordenadas de color con el software Color Tools vs.1.1.1, se demostró que el valor de luminosidad (L^*) y los valores de las coordenadas de color a^* y b^* tienen una relación directa con la presencia de cobre en los tejidos.

Objetivo específico 3: Determinar la contribución de las caracterizaciones elementales, superficiales y morfológicas del tejido no-funcionalizado y los tejidos obtenidos en el proceso de funcionalización con CuO_x con el estudio de la interacción físico-química entre los óxidos de cobre y la celulosa de la fibra de algodón.

- La caracterización elemental por ICP-MS resultó valioso para cuantificar la cantidad de cobre en los tejidos, la caracterización superficial por XPS demostró que existe una interacción química entre los grupos hidroxilos de la celulosa y el cobre, asimismo, en los resultados por TOF-SIMS se identificaron fragmentos orgánicos de Cu. La caracterización morfológica facilitó la observación de los CuO_x aglomerados aleatoriamente sobre la superficie de la fibra de algodón.

Objetivo específico 4: Determinar la resistencia de la propiedad antimicrobiana de los tejidos funcionalizados con CuO_x frente a las pruebas de lavado doméstico.

- Los tejidos de algodón funcionalizados *in situ* con CuO_x a partir de las tres sales de cobre inhibieron en más del 93%, el crecimiento de las bacterias *Escherichia coli* (ATCC 25922) y *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 10145) después de 5, 15 y 25 lavados, vale decir que, obtuvieron buena resistencia de la propiedad antimicrobiana frente a las pruebas de lavado doméstico.

Por lo tanto, se consiguió el objetivo general el cual fue el estudio la interacción físico-química entre la celulosa de algodón y CuO_x de tejidos antimicrobianos obtenidos por el método de teñido de agotamiento funcionalizados con estos mismos óxidos.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

Fueron funcionalizados *in situ* tejidos sarga de algodón con CuO_x por medio del proceso de teñido de agotamiento, usando tres sales precursoras de acetato, nitrato y sulfato de cobre.

Las características colorimétricas del tejido no-funcionalizado mostraron que su tono inicial fue amarillo con alta luminosidad, y con el transcurso del proceso de funcionalización se fue tornando verdoso y finalmente pardo rojizo asociado a la presencia de los CuO_x .

El Cu en los tejidos de algodón fue confirmado por medio del análisis químico elemental de ICP, donde se reportaron que el cobre de porcentaje inicial de 0,009% en peso en el tejido no-funcionalizado se incrementó alrededor del 40, 32 y 27% en peso para las muestras A5, N5 y S5, respectivamente, esto después del proceso de funcionalización. La solución a partir de la sal precursora de acetato de cobre presentó mejor agotamiento que las sales de nitrato y sulfato de cobre.

Los resultados de XPS mostraron que existe una posible interacción química entre los grupos hidroxilos de la celulosa y el cobre, cuya posible ruta de reacción podría originarse por el reemplazo de algunas moléculas de agua del complejo de cobre (II) por pares de electrones libres de los átomos de oxígenos de la celulosa, formando con este reemplazo un probable complejo de cobre-algodón, asimismo, por XPS también se observó que las muestras A5, N5 y S5 funcionalizadas con CuO_x presentaron picos asignados a los iones Cu^{+2} y Cu^{+1} .

A parte de ello, en las muestras A5, N5 y S5 se identificaron fragmentos orgánicos de Cu al ser analizadas por TOF-SIMS, y en sus caracterizaciones morfológicas se observaron que los CuO_x se aglomeraron en distintas formas y tamaños, las cuales estaban distribuidas aleatoriamente sobre la superficie de la fibra de algodón.

Las muestras A5, N5 y S5 inhibieron en más del 98%, el crecimiento de las bacterias *Escherichia coli* (ATCC 25922) y *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 10145) antes y después de 5, 15 y 25 lavados excepto para la muestra N5-25 lavados, cuya reducción fue de 93,2%. Finalmente, podemos concluir que los tejidos funcionalizados con CuO_x mantuvieron sus propiedades físicas iniciales y presentaron buena solidez al lavado, pero baja al sudor.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio cinético en la etapa de agotamiento primario del proceso de funcionalización del tejido de algodón con CuO_x para determinar el tiempo en el que se logra la absorción y difusión máxima del cobre por la fibra de algodón.
- Analizar por espectroscopía de fotoelectrones de rayos X la influencia de los productos químicos como sales de cobre e hidróxido de sodio por separado en el C1s de la fibra de algodón durante la etapa de agotamiento secundario.
- Realizar evaluaciones de la actividad antimicrobiana de los tejidos funcionalizados con CuO_x frente a las bacterias causantes del mayor número de IAAS en el Perú como la *Acinetobacter baumannii* y *Klebsiella pneumoniae*.
- Reducir el tiempo de contacto entre las bacterias y el material textil para evaluar la efectividad del tratamiento antibacteriano.
- Ampliar la investigación realizando una simulación del mecanismo de interacción entre la celulosa del algodón con los óxidos de cobre.
- Funcionalizar *in situ* con CuO_x tejidos teñidos con diferentes colorantes sintéticos como reactivos, directos, sulfonados y tina con la finalidad de evaluar su influencia en la tonalidad de los tejidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abou-Shakra, F. R. (2003). Biomedical applications of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) as an element specific detector for chromatographic separations. In Ian D. Wilson (Ed.), *Handbook of Analytical Separations* (Vol. Vol. 4). Amsterdam: Elsevier.
- Abou Elmaaty, T. M., Elsis, H., Elsayad, G., Elhadad, H., & Plutino, M. R. (2022). Recent advances in functionalization of cotton fabrics with nanotechnology. *Polymers (Basel)*, *14*(20), 4273. doi: 10.3390/polym14204273
- Abtew, M. A., Boussu, F., Bruniaux, P., Loghin, C., & Cristian, I. (2019). Ballistic impact mechanisms – A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. *Composite Structures*, *223*, 110966. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.110966
- Afonso, T., Moresco, R., Uarrota, V. G., Navarro, B. B., Nunes, E. D. C., Maraschin, M., & Rocha, M. (2017). UV-Vis and CIELAB based chemometric characterization of manihot esculenta carotenoid contents. *Journal of Integrative Bioinformatics*, *14*(4), 20170056. doi: 10.1515/jib-2017-0056
- AG Jacobs - Universität des Saarlandes. (2022). [homepage]. Photoelectron spectrometer, ESCALAB Mk II by vacuum generators. Alemania. Acceso el: 08 Jun. 2022. Disponible en: https://jacobs.physik.uni-saarland.de/home/index.php?page=steinbeiss/home_cms_steinbeissdet3-1&navi=service
- Ahmad, N., Rasheed, S., Ahmed, K., Musharraf, S. G., Najam-ul-Haq, M., & Hussain, D. (2023). Facile two-step functionalization of multifunctional superhydrophobic cotton fabric for UV-blocking, self cleaning, antibacterial, and oil-water separation. *Separation and Purification Technology*, *306*, 122626. doi: 10.1016/j.seppur.2022.122626
- Al-Hakkani, M. F. (2019). Guideline of inductively coupled plasma mass spectrometry “ICP-MS”: fundamentals, practices, determination of the limits, quality control, and method validation parameters. *SN Applied Sciences*, *1*(7). doi: 10.1007/s42452-019-0825-5
- Al-Shatty, W., Hill, D. A., Kiani, S., Stanulis, A., Winston, S., Powner, I., Alexander, S., & Barron, A. R. (2022). Superhydrophilic surface modification of fabric via coating with cysteine acid mineral oxide. *Applied Surface Science*, *580*, 152306. doi: 10.1016/j.apsusc.2021.152306
- Aldalbahi, A., El-Naggar, M. E., El-Newehy, M. H., Rahaman, M., Hatshan, M. R., & Khattab, T. A. (2021). Effects of technical textiles and synthetic nanofibers on environmental pollution. *Polymers*, *13*(1), 155. doi: 10.3390/polym13010155
- Ali, A., Baheti, V., Vik, M., & Militky, J. (2020). Copper electroless plating of cotton fabrics after surface activation with deposition of silver and copper nanoparticles. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, *137*, 109181. doi: 10.1016/j.jpcs.2019.109181
- Allaker, R. P. (2013). Nanoparticles and the control of oral biofilms. In K. Subramani, W. Ahmed & J. K. Hartsfield (Eds.), *Nanobiomaterials in clinical dentistry* (pp. 203-227). Massachusetts, USA: Elsevier.
- American Society for Testing and Materials - ASTM. (2013). ASTM E2149: Standard test method for determining the antimicrobial activity of antimicrobial agents under dynamic contact conditions. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.

- Amézquita, M. J. (2016). *Obtención de textiles antimicrobianos funcionalizados in situ con nanopartículas de óxido de cobre por el método de agotamiento*. (Bachiller - Tesis), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Amiri, M., Etemadifar, Z., Daneshkazemi, A., & Nateghi, M. (2017). Antimicrobial effect of copper oxide nanoparticles on some oral bacteria and candida species. *Journal of Dental Biomaterials*, 4(1), 347-352. doi: PMID: 28959764; PMCID: PMC5608049
- Andersen, K. G., Rambaut, A., Lipkin, W. I., Holmes, E. C., & Garry, R. F. (2020). The proximal origin of SARS-CoV-2. *Nature Medicine*, 26(4), 450-452. doi: 10.1038/s41591-020-0820-9
- Applerot, G., Lellouche, J., Lipovsky, A., Nitzan, Y., Lubart, R., Gedanken, A., & Banin, E. (2012). Understanding the antibacterial mechanism of CuO nanoparticles: revealing the route of induced oxidative stress. *Small*, 8(21), 3326-3337. doi: 10.1002/sml.201200772
- Aripov, K., & Ioelovich, M. (2020). Comparative study of supramolecular structure of cellulose in cotton fibers of *Gossypium hirsutum* and *Gossypium barbadense*. *Cellulose Chemistry and Technology*, 54(7-8), 635-641. doi: 10.35812/CelluloseChemTechnol.2020.54.62
- Åsbrink, S., & Norrby, L.-J. (1970). A refinement of the crystal structure of copper (II) oxide with a discussion of some exceptional e.s.d.'s. *Acta Crystallographica Section B Structural Crystallography and Crystal Chemistry*, 26(1), 8-15. doi: 10.1107/s0567740870001838
- Atkins, P. W. (2006). *Química Física*. Barcelona: Ediciones Omega.
- Babu, K. M. (2019). Printing and finishing of silk fabrics. In K. Muruges Babu (Ed.), *Silk: processing, properties and applications* (pp. 175-206). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Ballottin, D., Fulaz, S., Cabrini, F., Tsukamoto, J., Duran, N., Alves, O. L., & Tasic, L. (2017). Antimicrobial textiles: Biogenic silver nanoparticles against *Candida* and *Xanthomonas*. *Materials Science and Engineering C*, 75, 582-589. doi: 10.1016/j.msec.2017.02.110
- Bautista, L. (2015). Ballistic and impact protection finishes for textiles. In Paul Roshan (Ed.), *Functional finishes for textiles: Improving comfort, performance and protection* (pp. 579-606). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Bedlovicova, Z., Strapac, I., Balaz, M., & Salayova, A. (2020). A brief overview on antioxidant activity determination of silver nanoparticles. *Molecules*, 25(14), 3191. doi: 10.3390/molecules25143191
- Begam, R., Joshi, M., & Purwar, R. (2021). Antimicrobial finishing of cotton textiles using silver intercalated clay. *Fibers and Polymers*, 23(1), 148-154. doi: 10.1007/s12221-021-3178-9
- Bengalli, R., Colantuoni, A., Perelshtein, I., Gedanken, A., Collini, M., Mantecca, P., & Fiandra, L. (2021). In vitro skin toxicity of CuO and ZnO nanoparticles: Application in the safety assessment of antimicrobial coated textiles. *NanoImpact*, 21, 100282. doi: 10.1016/j.impact.2020.100282
- Bernhard, A., Caven, B., Wright, T., Burtscher, E., & Bechtold, T. (2022). Improving the ultraviolet protection factor of textiles through mechanical surface modification using calendaring. *Textile Research Journal*, 92(9-10), 1405-1414. doi: 10.1177/00405175211046624
- Bernhard, K., Dahringer, J., & Klanert, M. (2011). Flame-retardant hollow fiber with silicone-free soft-touch finish. United States. Patent Application No. 13/120434.
- Bhagavan, N. V., & Ha, C.-E. (2015). Three-dimensional structure of proteins and disorders of protein misfolding. In N. V. Bhagavan & Chung-Eun Ha (Eds.), *Essentials of medical biochemistry with clinical cases* (2nd ed., pp. 31-51). San Diego: Elsevier.

- Bhandari, V., Jose, S., Badanayak, P., Sankaran, A., & Anandan, V. (2022). Antimicrobial finishing of metals, metal oxides, and metal composites on textiles: A systematic review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *61*(1), 86-101. doi: 10.1021/acs.iecr.1c04203
- Biesinger, M. C. (2017). Advanced analysis of copper X-ray photoelectron spectra. *Surface and Interface Analysis*, *49*(13), 1325-1334. doi: 10.1002/sia.6239
- Birgand, G., Ahmad, R., Bulabula, A. N. H., Singh, S., Bearman, G., Sanchez, E. C., & Holmes, A. (2023). Innovation for infection prevention and control-revisiting Pasteur's vision. *Lancet*, *400*(10369), 2250-2260. doi: 10.1016/S0140-6736(22)02459-X
- Bishnoi, A., Rajaraman, T. S., Dube, C. L., & Ambegaonkar, N. J. (2021). Smart nanosensors for textiles: an introduction. In Andrea Ehrmann, Tuan Anh Nguyen & Phuong Nguyen Tri (Eds.), *Nanosensors and nanodevices for smart multifunctional textiles* (pp. 7-25). Amsterdam: Elsevier.
- Bonaldi, R. R. (2018). Functional finishes for high-performance apparel. In John Joseph McLoughlin & Tasneem Sabir (Eds.), *High-performance apparel: Materials, development, and applications* (pp. 129-156). Duxford: Woodhead Publishing.
- Botsa, S. M., Dharmasoth, R., & Basavaiah, K. (2018). A facile synthesis of Cu₂O and CuO nanoparticles via sonochemical assisted method. *Current Nanoscience*, *15*(2), 209-213. doi: 10.2174/1573413714666180530085447
- Briga-Sá, A., Nascimento, D., Teixeira, N., Pinto, J., Caldeira, F., Varum, H., & Paiva, A. (2013). Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution. *Construction and Building Materials*, *38*, 155-160. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.037
- Britannica, E. (2019). Condensation reaction. Encyclopaedia Britannica, Inc. Acceso el: 05 Ene. 2023. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/condensation-reaction>
- Brown, LeMay, Busten, Murphy, & Woodward. (2022). Chemistry of coordination chemistry. In Brown, LeMay, Busten, Murphy & Woodward (Eds.), *Chemistry: The central science: LibreTexts*.
- Brynildsen, M. P., Winkler, J. A., Spina, C. S., MacDonald, I. C., & Collins, J. J. (2013). Potentiating antibacterial activity by predictably enhancing endogenous microbial ROS production. *Nature Biotechnology*, *31*(2), 160-165. doi: 10.1038/nbt.2458
- Cegarra, J. S. (1987). *Fundamentos de la maquinaria de tintorería*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Centro Nacional de Epidemiología Prevención y Control de Enfermedades - MINSA. (2020). Riesgo de incremento de infecciones asociadas a la atención de salud (IAAS), en el contexto de la epidemia de COVID-19 en el país. Perú. Acceso el: 15 Dic. 2021. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minsa/informes-publicaciones/1304860-riesgo-de-incremento-de-infecciones-asociadas-a-la-atencion-de-salud-iaas-en-el-contexto-de-la-epidemia-del-covid-19-en-el-pais-alerta-epidemiologica-n-20>
- Clark, J. (2020). [homepage]. Chemistry of copper. Cornwall. Acceso el: 06 Ene. 2023. Disponible en: <https://chem.libretexts.org/@go/page/3722>
- Clark, M. (2011a). *Handbook of textile and industrial dyeing. Volumen 1: Principles, processes and types of dyes*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Clark, M. (2011b). *Handbook of textile and industrial dyeing: Volume 2: Applications of dyes* (Vol. Vol. 2). Cambridge: Woodhead Publishing.

- Collins, A. S. (2008). Preventing health care – associated infections. In R. G. Hughes (Ed.), *Patient safety and quality: An evidence-based handbook for nurses* (Vol. 2, pp. 547-570). Rockville (MD): Agency for Healthcare Research and Quality.
- Condori, C., & Vivas, D. (2016). *Obtención a nivel industrial de nanopartículas de óxido de cobre (CuO) a partir de sulfato de cobre pentahidratado (CuSO₄.5H₂O) y su aplicación en tejidos textiles como actividad antimicrobiana*. (Bachiller - Tesis), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Cossart, P., & Helenius, A. (2014). Endocytosis of viruses and bacteria. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 6(8), a016972. doi: 10.1101/cshperspect.a016972
- Cotton, F. A., & Wilkinson, G. (1972). *Advanced inorganic chemistry*. New York: Interscience Publishers.
- Crowley, T. E. (2020). Mass spectrometry. In Thomas E. Crowley (Ed.), *Purification and characterization of secondary metabolites: A laboratory manual for analytical and structural biochemistry* (1st ed., pp. 59-66). Londres: Elsevier.
- Cubadda, F. (2007). Inductively coupled plasma mass spectrometry. In Y. Picó (Ed.), *Food toxicants analysis*. Amsterdam: Elsevier.
- Chauhan, D. S., Quraishi, M. A., Carrière, C., Seyeux, A., Marcus, P., & Singh, A. (2019). Electrochemical, ToF-SIMS and computational studies of 4-amino-5-methyl-4H-1,2,4-triazole-3-thiol as a novel corrosion inhibitor for copper in 3.5% NaCl. *Journal of Molecular Liquids*, 289, 111113. doi: 10.1016/j.molliq.2019.111113
- Chemguide. (2015). [homepage]. Copper. Acceso el: 20 Abr. 2022. Disponible en: <https://www.chemguide.co.uk/inorganic/transition/copper.html>
- Chemguide. (2021). [homepage]. An introduction to complex metal ions. Acceso el: 04 Jun. 2022. Disponible en: <https://www.chemguide.co.uk/inorganic/complexions/whatis.html>
- Choudhury, A. K. R. (2017). Introduction to finishing. In Asim Kumar Roy Choudhury (Ed.), *Principles of textile finishing* (pp. 1-19). Duxford: Woodhead Publishing.
- Dai, D., Huang, P.-Y., Wu, T.-Y., Shih, C.-H., & Chang, L. (2023). Epitaxial electrodeposition of Cu₂O on Ag substrates in sulfate baths. *Journal of Crystal Growth*, 603, 126983. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2022.126983
- Davarpanah, S. J., Karimian, R., Goodarzi, V., & Piri, F. (2015). Synthesis of copper (II) oxide (CuO) nanoparticles and its application as gas sensor. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, 2(4), 329-332.
- de Oliveira, C., Mulinari, J., Batistella, M., Ulson de Souza, A. A., & Ulson de Souza, S. M. d. A. G. (2023). Antimicrobial effect of cotton fabric functionalized with a kaolinite-titania nano-hybrid composite. *Materials Chemistry and Physics*, 295, 127078. doi: 10.1016/j.matchemphys.2022.127078
- de Souza, S. F., Cherian, B. M., Leão, A. L., Kozłowski, R. M., & Thomas, S. (2020). Natural fibres for geotextiles. In Ryszard M. Kozłowski & M. Mackiewicz-Talarczyk (Eds.), *Handbook of natural fibres. Volumen 2: Processing and applications* (pp. 499-530). Duxford: Woodhead Publishing.
- Degani, O. (2021). Synergism between cutinase and pectinase in the hydrolysis of cotton fibers' cuticle. *Catalysts*, 11(1), 84. doi: 10.3390/catal11010084
- Devipriya, D., & Roopan, S. M. (2017). *Cissus quadrangularis* mediated ecofriendly synthesis of copper oxide nanoparticles and its antifungal studies against *Aspergillus niger*, *Aspergillus*

flavus. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications*, 80, 38-44. doi: 10.1016/j.msec.2017.05.130

Dewangan, M. K., & Panigrahi, S. K. (2021). Factors influencing the ballistic impact mechanisms of textile composite materials: a review. *Polymers for Advanced Technologies*, 32(5), 1901-1923. doi: 10.1002/pat.5236

Dharmadhikari, D. V., Phirange, A. S., Sabharwal, S. G., & Athawale, A. A. (2018). Precursor-dependent structural properties and antibacterial activity of copper oxide. *Bulletin of Materials Science*, 41(4), 98. doi: 10.1007/s12034-018-1613-3

Dochia, M., Sirghie, C., Kozłowski, R. M., & Roskwitalski, Z. (2012). Cotton fibres. In R. M. Kozłowski (Ed.), *Handbook of natural fibres. Volume 1: Types, properties and factors affecting breeding and cultivation* (pp. 11-23). Cambridge: Woodhead Publishing.

Duszynska, W., Rosenthal, V. D., Szczesny, A., Zajaczkowska, K., Fulek, M., & Tomaszewski, J. (2020). Device associated -health care associated infections monitoring, prevention and cost assessment at intensive care unit of University Hospital in Poland (2015-2017). *BMC infectious diseases*, 20(1), 761. doi: 10.1186/s12879-020-05482-w

Eid, B. M., & Ibrahim, N. A. (2021). Recent developments in sustainable finishing of cellulosic textiles employing biotechnology. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124701. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124701

El-Nahhal, I. M., Elmanama, A. A., Amara, N., Qodih, F. S., Selmane, M., & Chehimi, M. M. (2018). The efficacy of surfactants in stabilizing coating of nano-structured CuO particles onto the surface of cotton fibers and their antimicrobial activity. *Materials Chemistry and Physics*, 215, 221-228. doi: 10.1016/j.matchemphys.2018.05.012

El-Sayed, H., Mowafi, S., & Basuoni, A. S. (2022). One-pot multi-functional finishing of wool fabric using reactive nonionic softener. *Heliyon*, 8(10), e10985. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10985

El Mogahzy, Y. E. (2020). *Engineering textiles integrating the design and manufacture of textile products* (2nd ed.). Duxford: Woodhead Publishing.

Elmogahzy, Y. E. (2020). Performance characteristics of technical textiles: Part II: Transportation textiles. In Yehia E. Elmogahzy (Ed.), *Engineering textiles: Integrating the design and manufacture of textile products* (2nd ed., pp. 365-398). Duxford, Reino Unido: Woodhead Publishing.

Emam, H. E. (2019). Generic strategies for functionalization of cellulosic textiles with metal salts. *Cellulose*, 26(3), 1431-1447. doi: 10.1007/s10570-018-2185-5

Errokh, A., Ferraria, A. M., Conceicao, D. S., Vieira Ferreira, L. F., Botelho do Rego, A. M., Rei Vilar, M., & Boufi, S. (2016). Controlled growth of Cu₂O nanoparticles bound to cotton fibres. *Carbohydrate polymers*, 141, 229-237. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.01.019

Escobedo-Morales, A., Esparza, R., García-Ruiz, A., Aguilar, A., Rubio-Rosas, E., & Pérez, R. (2011). Structural and vibrational properties of hydrothermally grown ZnO₂ nanoparticles. *Journal of Crystal Growth*, 316, 37-41.

Fahmy, H. M., Okda, H. M. Y., Hassabo, A. G., El-Rafie, M. H., & Youssef, M. A. (2022). Synthesis of new silicone-based adducts to functionalize cotton fabric. *Silicon*, 14(13), 7613-7621. doi: 10.1007/s12633-021-01451-3

Faraldos, M., & Goberna, C. (2011). *Técnicas de análisis y caracterización de materiales* (2da ed.). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

- Fearn, S. (2015). *An introduction to time-of-flight secondary ion mass spectrometry (ToF-SIMS) and its application to materials science*. Bristol: Morgan & Claypool.
- Ferro, F. F., Lionello, M., Rampazzo, M., Beghi, A., & Guay, M. (2020). Real-time efficient operation of decontaminating processes via a geometric-based extremum seeking control. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 1614-1620. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2208
- Foelske-Schmitz, A. (2018). X-Ray photoelectron spectroscopy in electrochemistry research. In Klaus Wandelt (Ed.), *Encyclopedia of interfacial chemistry: Surface science and electrochemistry* (1st ed., pp. 591-606). USA: Elsevier.
- Gandhi, K. L. (2020). *Woven textiles: Principles, technologies and applications* (2nd Ed.). Duxford: Woodhead Publishing.
- Garro, G. M. (2021). Brotes de infecciones asociadas a la atención de la salud en épocas de pandemia. *Boletín epidemiológico del Perú.*, 30(SE 43), 1378-1383.
- Gattinoni, C., & Michaelides, A. (2015). Atomistic details of oxide surfaces and surface oxidation: the example of copper and its oxides. *Surface Science Reports*, 70(3), 424-447. doi: 10.1016/j.surfrep.2015.07.001
- Gedanken, A., Perkas, N., Perelshtein, I., Applerot, G., Lipovsky, A., Nitzan, Y., & Lubart, R. (2011). Preparation of antimicrobial textiles using a sonochemical method. *Recent Patents on Biomedical Engineering*, 4(1), 1-5. doi: 10.2174/1874764711104010001
- Geranio, L., Heuberger, M., & Nowack, B. (2009). The behavior of silver nanotextiles during washing. *Environmental Science & Technology*, 43(21), 8113–8118. doi: 10.1021/es9018332
- Ghaly, A. E., Ananthashankar, R., Alhattab, M., & Ramakrishnan, V. V. (2014). Production, characterization and treatment of textile effluents: a critical review. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 05(01), 1000182. doi: 10.4172/2157-7048.1000182
- Ghijssen, J., Tjeng, L. H., van Elp, J., Eskes, H., Westerink, J., Sawatzky, G. A., & Czyzyk, M. T. (1988). Electronic structure of Cu₂O and CuO. *Physical Review. B, Condensed Matter*, 38(16), 11322-11330. doi: 10.1103/physrevb.38.11322
- Giannousi, K., Pantazaki, A., & Dendrinou-Samara, C. (2017). Copper-based nanoparticles as antimicrobials. In Anton Ficaí & Alexandru Mihai Grumezescu (Eds.), *Nanostructures for antimicrobial therapy* (1st ed., pp. 515-529). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Gilchrist, A., & Nobbs, J. (2017). Colorimetry, theory. In John C. Lindon, George E. Tranter & David W. Koppenaal (Eds.), *Encyclopedia of spectroscopy and spectrometry* (3rd ed., pp. 328-333). Oxford: Academic Press.
- Goldberg, M. W., & Allen, T. D. (2023). Scanning Electron Microscopy in Cell Biology. In Ralph A. Bradshaw, Gerald W. Hart & Philip D. Stahl (Eds.), *Encyclopedia of cell biology* (2nd ed., pp. 16-27). Amsterdam: Elsevier.
- Gonzalez-Martin, C. (2017). Airborne infectious microorganisms *Reference Module in Life Sciences*. Spain: Elsevier.
- Gordon, S., & Hsieh, Y. L. (2007). *Cotton: Science and technology*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Grae, N., Singh, A., Jowitt, D., Flynn, A., Mountier, E., Clendon, G., Barratt, R., Gibson, B., Williams, C., Roberts, S. A., & Morris, A. J. (2023). Prevalence of healthcare-associated infections in public hospitals in New Zealand, 2021. *The Journal of Hospital Infection*, 131, 164-172. doi: 10.1016/j.jhin.2022.10.002

Grand View Research. (2020). [homepage]. Technical textile market size, share & trends analysis report by manufacturing (thermo-forming, 3D weaving, 3D knitting, finishing treatments, hand-made elements), by end use, by region, and segment forecasts, 2020 - 2027. Estados Unidos. Acceso el: 25 Ene. 2021. Disponible en: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/technical-textiles-market>

Gries, T., Veit, D., Wulfhorst, B., & Schuster, P. (2015). *Textile technology: An introduction* (2nd ed.). Munich: Hanser.

Hardcastle, J. M. (2020). Woven textiles for automotive interiors and other transportation applications. In K.L. Gandhi (Ed.), *Woven textiles: Principles, technologies and applications* (2nd ed., pp. 395-422). Duxford, Reino Unido: Woodhead Publishing.

Hasanzadeh, M., Shahriyari Far, H., Haji, A., & Rosace, G. (2022). Surface modification of polyester/viscose fabric with silica hydrosol and amino-functionalized polydimethylsiloxane for the preparation of a fluorine-free superhydrophobic and breathable textile. *Coatings*, 12(3), 398. doi: 10.3390/coatings12030398

Hasheminya, S.-M., Rezaei Mokarram, R., Ghanbarzadeh, B., Hamishekar, H., & Kafil, H. S. (2018). Physicochemical, mechanical, optical, microstructural and antimicrobial properties of novel kefiran-carboxymethyl cellulose biocomposite films as influenced by copper oxide nanoparticles (CuONPs). *Food Packaging and Shelf Life*, 17, 196-204. doi: 10.1016/j.fpsl.2018.07.003

Haule, L. V., & Nambela, L. (2022). Sustainable application of nanomaterial for finishing of textile material. In Uma Shanker, Chaudhery Mustansar Hussain & Manvir Rani (Eds.), *Green nanomaterials for industrial applications* (pp. 177-206). Amsterdam: Elsevier.

Hoang, H. T. T., Duong, T. T., Nguyen, K. T., Le, Q. T. P., Luu, M. T. N., Trinh, D. A., Le, A. H., Ho, C. T., Dang, K. D., Nemery, J., Orange, D., & Klein, J. (2018). Impact of anthropogenic activities on water quality and plankton communities in the Day River (Red River Delta, Vietnam). *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(2), 67. doi: 10.1007/s10661-017-6435-z

Horrocks, A. R., & Anand, S. C. (2016a). *Handbook of technical textiles, Volume 2: Technical textile applications* (2nd ed. Vol. Vol. 2). Duxford: Woodhead Publishing.

Horrocks, A. R., & Anand, S. C. (2016b). *Handbook of technical textiles, Volumen 1: Technical textile processes* (2nd ed. Vol. Vol. 1). Cambridge: Woodhead Publishing.

Hou, J., Wang, X., Hayat, T., & Wang, X. (2017). Ecotoxicological effects and mechanism of CuO nanoparticles to individual organisms. *Environmental Pollution (Oxford, United Kingdom)*, 221, 209-217. doi: 10.1016/j.envpol.2016.11.066

Houc, M. M. (2009). *Identification of textile fibers*. Cambridge: Woodhead Publishing.

Howden, S. M., Soussana, J. F., Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M., & Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(50), 19691-19696. doi: 10.1073/pnas.0701890104

Huang, C., Zhao, Y., Liu, Y., Chen, Y., Li, C., & Li, Z. (2018). Surface characterization of plasma-treated eucalyptus alkaline peroxide mechanical pulp using electronic spectroscopy chemical analysis and atomic force microscopy. *BioResources*, 13(2), 3500-3510. doi: 10.15376/biores.13.2.3500-3510

Huang, H., Qiao, Y., Yuan, Y., & Zhang, J. (2022). Surface functionalization for heterogeneous catalysis. *Reference module in materials science and materials engineering*. doi: 10.1016/b978-0-12-822425-0.00073-7

- Huang, M.-L., Cai, Z., Wu, Y.-Z., Lu, S.-G., Luo, B.-S., & Li, Y.-H. (2020). Metallic coloration on polyester fabric with sputtered copper and copper oxides films. *Vacuum*, *178*, 109489. doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109489
- Huang, Z., Wu, P., Yin, Y., Zhou, X., Fu, L., Wang, L., Chen, S., & Tang, X. (2022). Preparation of pyridine-modified cotton fibers for anionic dye treatment. *Reactive and Functional Polymers*, *172*, 105155. doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2021.105155
- Iqbal, M. S., Tang, S., Sarfraz, Z., Iqbal, M. S., Li, H., He, S., Jia, Y., Sun, G., Pan, Z., Xiaoli, G., Mahmood, A., Ahmad, S., Nazir, M. F., Chen, B., Wang, L., Pang, B., Wei, S., & Du, X. (2021). Genetic factors underlying single fiber quality in A-genome donor Asian cotton (*Gossypium arboreum*). *Frontiers in Genetics*, *12*, 758665. doi: 10.3389/fgene.2021.758665
- ISO-FDIS-7211-5. (2020). Textiles - methods for analysis of woven fabrics construction - Part 5: determination of linear density of yarn removed from fabric (pp. 1-4): International Organization for Standardization.
- ISO 105-C06. (1994). Textiles - tests for colour fastness - Part C06: colour fastness to domestic and commercial laundering (pp. 1-15): International Organization for Standardization.
- ISO 105-C06. (2010). Textiles - tests for colour fastness - Part C06: colour fastness to domestic and commercial laundering (pp. 1-9): International Organization for Standardization.
- ISO 105-E04. (2013). Textiles - tests for colour fastness - Part E04: Colour fastness to perspiration (pp. 1-6): International Organization for Standardization.
- Jayas, D. S., Ghosh, P. K., Paliwal, J., & Karunakaran, C. (2008). Quality evaluation of wheat. In Da-Wen Sun (Ed.), *Computer vision technology for food quality evaluation* (pp. 351-376). Massachusetts: Academic Press.
- Jeon, H. Y. (2016). Geotextile composites having multiple functions. In R.M. Koerner (Ed.), *Geotextiles from design to applications* (pp. 413-425). Duxford: Woodhead Publishing.
- Jurado-López, B., Vieira, R. S., Rabelo, R. B., Beppu, M. M., Casado, J., & Rodríguez-Castellón, E. (2017). Formation of complexes between functionalized chitosan membranes and copper: A study by angle resolved XPS. *Materials Chemistry and Physics*, *185*, 152-161. doi: 10.1016/j.matchemphys.2016.10.018
- Kalaskar, D. M., Ulijn, R. V., Gough, J. E., Alexander, M. R., Scurr, D. J., Sampson, W. W., & Eichhorn, S. J. (2010). Characterisation of amino acid modified cellulose surfaces using ToF-SIMS and XPS. *Cellulose*, *17*(4), 747-756. doi: 10.1007/s10570-010-9413-y
- Khalifa, I. B., & Ladhari, N. (2019). Hydrophobic behavior of cotton fabric activated with air atmospheric-pressure plasma. *Journal of the Textile Institute*, *111*(8), 1191-1197. doi: 10.1080/00405000.2019.1688907
- Khandual, A., Luximon, A., Sachdeva, A., Rout, N., & Sahoo, P. K. (2015). Enhancement of functional properties of cotton by conventional dyeing with TiO₂ nanoparticles. *Materials today: Proceedings*, *2*(4-5), 3674-3683. doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.128
- Kim, H. J., Liu, Y., French, A. D., Lee, C. M., & Kim, S. H. (2018). Comparison and validation of Fourier transform infrared spectroscopic methods for monitoring secondary cell wall cellulose from cotton fibers. *Cellulose*, *25*(1), 49-64. doi: 10.1007/s10570-017-1547-8
- Kohli, R. (2012). Developments in imaging and analysis techniques for micro- and nanosize particles and surface features. In Rajiv Kohli & K.L. Mittal (Eds.), *Developments in surface contamination and cleaning* (pp. 215-306). Houston: Elsevier.

- Korkmaz, N., & Alay Aksoy, S. (2015). Enhancing the performance properties of ester-cross-linked cotton fabrics using Al₂O₃-NPs. *Textile Research Journal*, 86(6), 636-648. doi: 10.1177/0040517515592806
- Kothari, N., Bhagia, S., Zaher, M., Pu, Y., Mittal, A., Yoo, C. G., Himmel, M. E., Ragauskas, A. J., Kumar, R., & Wyman, C. E. (2019). Cellulose hydrolysis by *Clostridium thermocellum* agnostic to substrate structural properties in contrast to fungal cellulases. *Green Chemistry*, 21(10), 2810-2822. doi: 10.1039/c9gc00262f
- Kozłowski, R., & Mackiewicz-Talarczyk, M. (2020). *Handbook of natural fibres. Volumen 2: Processing and applications* (2nd ed.). Duxford: Woodhead Publishing.
- Kozłowski, R. M., & Walentowska, J. (2020). Prevention of fungi and bacteria growth in natural fibres. In Ryszard M. Kozłowski & M. Mackiewicz-Talarczyk (Eds.), *Handbook of natural fibres. Volume 1: Types, properties and factors affecting breeding and cultivation* (pp. 693-714). Duxford: Woodhead Publishing.
- Kumar, R., Sharma, R. K., & Singh, A. P. (2017). Grafted cellulose: a bio-based polymer for durable applications. *Polymer Bulletin*, 75(5), 2213-2242. doi: 10.1007/s00289-017-2136-6
- Lee, J.-H., Cheng, I.-C., Hua, H., & Wu, S.-T. (2020). Color science and engineering. In Jiun-Haw Lee, I-Chun Cheng, Hong Hua & Shin-Tson Wu (Eds.), *Introduction to flat panel displays* (2nd ed., pp. 15-37). Nueva Jersey: Wiley.
- Leon, K., Lopez, A., Gago, J., & Solis, J. (2009). Sintesis sonoquímica de nanopartículas de CuO impregnadas en tejidos de algodón. Caracterización y actividad antimicrobiana. In Julio Santiago, Alcides López & Bertha Ramos (Eds.), *Informe Científico tecnológico*. Lima: Instituto Peruano de Energía Nuclear - IPEN.
- Li, D., Tang, Y., Ao, D., Xiang, X., Wang, S., & Zu, X. (2019). Ultra-highly sensitive and selective H₂S gas sensor based on CuO with sub-ppb detection limit. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(7), 3985-3992. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.083
- Li, J., Zhang, Y., Li, L., Wang, Y., Zhang, L., Zhang, B., & Wang, F. (2020). Formation of dumbbell and sphere-like CuO as high-performance anode materials for lithium ion batteries. *Materials Letters*, 261, 127058. doi: 10.1016/j.matlet.2019.127058
- Li, N., Kang, G., Liu, H., Li, M., Qiu, W., Wang, Q., Liu, L., Yu, J., Li, B., Li, F., & Wu, D. (2022). Hybrid nanoparticles based on novel Schiff Base for durable flame retardant and antibacterial properties. *Composites Part B: Engineering*, 238, 109905. doi: 10.1016/j.compositesb.2022.109905
- Li, R., Jia, Z., & Trush, M. A. (2016). Defining ROS in biology and medicine. *Reactive Oxygen Species*, 1(1), 9-21. doi: 10.20455/ros.2016.803
- Li, Z., Cheng, J., Yang, X., Liu, H., Xu, X., Ma, L., Shang, S., & Song, Z. (2020). Construction of antimicrobial and biocompatible cotton textile based on quaternary ammonium salt from rosin acid. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 1-8. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.01.259
- Limpiteprakan, P., Babel, S., Lohwacharin, J., & Takizawa, S. (2016). Release of silver nanoparticles from fabrics during the course of sequential washing. *Environmental Science and Pollution Research International*, 23(22), 22810-22818. doi: 10.1007/s11356-016-7486-3
- Madhu, A., & Chakraborty, J. N. (2017). Developments in application of enzymes for textile processing. *Journal of Cleaner Production*, 145, 114-133. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.013

- Mageshwari, K., & Sathyamoorthy, R. (2013). Flower-shaped CuO nanostructures: Synthesis, characterization and antimicrobial activity. *Journal of Materials Science & Technology*, 29(10), 909-914. doi: 10.1016/j.jmst.2013.04.020
- Majumdar, A., Das, A., Alagirusamy, R., & Kothari, V. K. (2013). *Process control in textile manufacturing*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Mangala, J., & Bapan, A. (2019). Advances in nanotechnology based functional, smart and intelligent textiles: a review. In David L. Andrews, Robert H. Lipson & Thomas Nann (Eds.), *Comprehensive nanoscience and nanotechnology* (Vol. 5, pp. 253-290). New Delhi: Elsevier.
- Mao, N., & Russell, S. J. (2015). Fibre to fabric: Nonwoven fabrics. In Rose Sinclair (Ed.), *Textiles and fashion: Materials, design and technology* (pp. 307-335). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Markova, I. (2019a). Front matter. In Ivana Markova (Ed.), *Textile fiber microscopy: A practical approach* (pp. i-xxvii). Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Ltd.
- Markova, I. (2019b). Natural cellulosic fibers. In Ivana Markova (Ed.), *Textile fiber microscopy: A practical approach* (pp. 1-30). Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Ltd.
- Marković, D., Ašanin, J., Nunney, T., Radovanović, Z., Radoičić, M., Mitrić, M., Mišić, D., & Radetić, M. (2019). Broad spectrum of antimicrobial activity of cotton fabric modified with oxalic acid and CuO/Cu₂O nanoparticles. *Fibers and Polymers*, 20(11), 2317-2325. doi: 10.1007/s12221-019-9131-5
- Markovic, D., Deeks, C., Nunney, T., Radovanovic, Z., Radoicic, M., Saponjic, Z., & Radetic, M. (2018). Antibacterial activity of Cu-based nanoparticles synthesized on the cotton fabrics modified with polycarboxylic acids. *Carbohydrate Polymers*, 200, 173-182. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.08.001
- Martinez-Sanz, M., Pettolino, F., Flanagan, B., Gidley, M. J., & Gilbert, E. P. (2017). Structure of cellulose microfibrils in mature cotton fibres. *Carbohydrate Polymers*, 175, 450-463. doi: 10.1016/j.carbpol.2017.07.090
- Martínez de Yuso, M. (2015). *Aplicaciones de la espectroscopía fotoelectrónica de rayos X en la caracterización de materiales funcionales*. (Doctor - Tesis), Universidad de Málaga, Málaga.
- Matos, J. C., Avelar, I., Martins, M. B., & Goncalves, M. C. (2017). Greensilica(R) vectors for smart textiles. *Carbohydrate polymers*, 156, 268-275. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.08.015
- Mbamkeu Chakounté, R. G., Jolibois, J., Kappertz, O., Chambers, J., Weis, H., Wiame, H., & Viöl, W. (2022). Water and oil repellent coating on fabric using hollow cathode PECVD. *Surface and Coatings Technology*, 446, 128816. doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128816
- Mditshwa, A., Magwaza, L. S., & Tesfay, S. Z. (2019). Shade netting on subtropical fruit: effect on environmental conditions, tree physiology and fruit quality. *Scientia Horticulturae*, 256, 108556. doi: 10.1016/j.scienta.2019.108556
- Meredith, L. W., Hamilton, W. L., Warne, B., Houldcroft, C. J., Hosmillo, M., Jahun, A. S., Curran, M. D., Parmar, S., Caller, L. G., Caddy, S. L., et al. (2020). Rapid implementation of SARS-CoV-2 sequencing to investigate cases of health-care associated COVID-19: a prospective genomic surveillance study. *Lancet Infectious Diseases*, 20(11), 1263-1272. doi: 10.1016/s1473-3099(20)30562-4
- Milošević, M., Radoičić, M., Saponjic, Z., Nunney, T., Deeks, C., Lazić, V., Mitrić, M., Radetić, T., & Radetić, M. (2014). In situ photoreduction of Ag⁺-ions by TiO₂ nanoparticles deposited on cotton and cotton/PET fabrics. *Cellulose*, 21(5), 3781-3795. doi: 10.1007/s10570-014-0373-5

- Minoshima, M., Lu, Y., Kimura, T., Nakano, R., Ishiguro, H., Kubota, Y., Hashimoto, K., & Sunada, K. (2016). Comparison of the antiviral effect of solid-state copper and silver compounds. *Journal of Hazardous Materials*, *312*, 1-7. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.03.023
- Mitchell, R., Carr, C. M., Parfitt, M., Vickerman, J. C., & Jones, C. (2005). Surface chemical analysis of raw cotton fibres and associated materials. *Cellulose*, *12*(6), 629-639. doi: 10.1007/s10570-005-9000-9
- Mongiovi, C., Crini, G., Gabrion, X., Placet, V., Blondeau-Patissier, V., Krystianiak, A., Durand, S., Beaugrand, J., Dorlando, A., Rivard, C., et al. (2022). Revealing the adsorption mechanism of copper on hemp-based materials through EDX, nano-CT, XPS, FTIR, Raman, and XANES characterization techniques. *Chemical Engineering Journal Advances*, *10*, 100282. doi: 10.1016/j.ceja.2022.100282
- Montazer, M., & Maali Amiri, M. (2014). ZnO nano reactor on textiles and polymers: *ex situ* and *in situ* synthesis, application, and characterization. *Journal of Physical Chemistry B*, *118*(6), 1453-1470. doi: 10.1021/jp408532r
- Morton, W. E., & Hearle, J. W. S. (2008). *Physical properties of textile fibres* (4 ed.). Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.
- Munir, M. U., Ashraf, M., Abid, H. A., Javid, A., Riaz, S., Khanzada, H., Rehman, A., & Iqbal, K. (2022). Coating of modified ZnO nanoparticles on cotton fabrics for enhanced functional characteristics. *Journal of Coatings Technology and Research*, *19*(2), 467-475. doi: 10.1007/s11998-021-00533-6
- Naebe, M., Haque, A. N. M. A., & Haji, A. (2022). Plasma-assisted antimicrobial finishing of textiles: A review. *Engineering*, *12*, 145-163. doi: 10.1016/j.eng.2021.01.011
- Nageswaran, G., Choudhary, Y. S., & Jagannathan, S. (2017). Inductively coupled plasma mass spectrometry. In Sabu Thomas, Raju Thomas, A. K. Zachariah & Raghvendra Kumar (Eds.), *Spectroscopic methods for nanomaterials characterization* (pp. 163-194). Amsterdam: Elsevier.
- Nam, S., Hillyer, M. B., Condon, B. D., Lum, J. S., Richards, M. N., & Zhang, Q. (2020). Silver nanoparticle-infused cotton fiber: durability and aqueous release of silver in laundry water. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *68*(46), 13231-13240. doi: 10.1021/acs.jafc.9b07531
- Nam, S., Selling, G. W., Hillyer, M. B., Condon, B. D., Rahman, M. S., & Chang, S. (2021). Brown cotton fibers self-produce Ag nanoparticles for regenerating their antimicrobial surfaces. *ACS Applied Nano Materials*, *4*(12), 13112-13122. doi: 10.1021/acsanm.1c02640
- Naveena, D., Logu, T., Sethuraman, K., & Bose, A. C. (2019). Significant enhancement of photo-physicochemical properties of Yb doped copper oxide thin films for efficient solid-state solar cell. *Journal of Alloys and Compounds*, *795*, 187-196. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.04.233
- Nawab, Y. (2016). *Textile Engineering*. Berlin: Germany: Gruyter Textbook.
- NBR10588. (2015). Tecidos planos - determinação da densidade de fios (pp. 1-2): Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR 12996. (1993). Materiais têxteis - Determinação dos ligamentos fundamentais de tecidos planos (pp. 1-2): Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Nguyen, K. T. Q., Navaratnam, S., Mendis, P., Zhang, K., Barnett, J., & Wang, H. (2020). Fire safety of composites in prefabricated buildings: from fibre reinforced polymer to textile reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, *187*, 107815. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107815

- Nortjie, E., Basitere, M., Moyo, D., & Nyamukamba, P. (2022). Extraction methods, quantitative and qualitative phytochemical screening of medicinal plants for antimicrobial textiles: A review. *Plants (Basel)*, *11*(15). doi: 10.3390/plants11152011
- Nozari, B., Montazer, M., & Mahmoudi Rad, M. (2021). Stable ZnO/SiO₂ nano coating on polyester for anti-bacterial, self-cleaning and flame retardant applications. *Materials Chemistry and Physics*, *267*, 124674. doi: 10.1016/j.matchemphys.2021.124674
- Oliveira, G. A. d., Lapuente, J. d., Teixido, E., Porredon, C., Borrás, M., & de Oliveira, D. P. (2016). Textile dyes induce toxicity on zebrafish early life stages. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *35*(2), 429-434. doi: 10.1002/etc.3202
- Oluwaseun, A. C., Adefusika, A. M., & Abel, I. (2021). Natural antimicrobial agents derived from beneficial microorganisms and plants and their application in the textile industry. In Md. Ibrahim H. Monda (Ed.), *Antimicrobial textiles from natural resources* (pp. 165-188). Duxford: Woodhead Publishing.
- Omidi, M., Fatehinya, A., Farahani, M., Akbari, Z., Shahmoradi, S., Yazdian, F., Tahriri, M., Moharamzadeh, K., Tayebi, L., & Vashae, D. (2017). Characterization of biomaterials. In Lobat Tayebi & Keyvan Moharamzadeh (Eds.), *Biomaterials for oral and dental tissue engineering* (pp. 97-115). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Organización Panamericana de la Salud. (2017). *Prevención y control de infecciones asociadas a la atención de la salud. Recomendaciones básicas*. Washington: OPS.
- Palza, H. (2015). Antimicrobial polymers with metal nanoparticles. *International journal of molecular sciences*, *16*(1), 2099-2116. doi: 10.3390/ijms16012099
- Pankratova, G., Hederstedt, L., & Gorton, L. (2019). Extracellular electron transfer features of Gram-positive bacteria. *Analytica Chimica Acta*, *1076*, 32-47. doi: 10.1016/j.aca.2019.05.007
- Parajuli, P., Acharya, S., Rumi, S. S., Hossain, T., & Abidi, N. (2021). Regenerated cellulose in textiles: rayon, lyocell, modal and other fibres. In Ibrahim H. Mondal (Ed.), *Fundamentals of natural fibres and textiles* (pp. 87-110). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Patel, R. H., Kachhia, P. H., & Sharma, S. (2019). Studies on the high thermal conduction fluid by incorporating CuO nanoparticles in a liquid coolant. *Materials Today: Proceedings*, *18*, 1291-1296. doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.591
- Paul, R., & Genescà, E. (2013). The use of enzymatic techniques in the finishing of technical textiles. In M.L. Gulrajani (Ed.), *Advances in the dyeing and finishing of technical textiles* (pp. 177-198). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Peets, P., Leito, I., Pelt, J., & Vahur, S. (2017). Identification and classification of textile fibres using ATR-FT-IR spectroscopy with chemometric methods. *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *173*, 175-181. doi: 10.1016/j.saa.2016.09.007
- Perelshtein, I., Lipovsky, A., Perkas, N., Tzanov, T., Arguirova, M., Leseva, M., & Gedanken, A. (2015). Making the hospital a safer place by sonochemical coating of all its textiles with antibacterial nanoparticles. *Ultrasonics Sonochemistry*, *25*, 82-88. doi: 10.1016/j.ultsonch.2014.12.012
- Perelshtein, I., Ruderman, Y., Perkas, N., Beddow, J., Singh, G., Vinatoru, M., Joyce, E., Mason, T. J., Blanes, M., Mollá, K., & Gedanken, A. (2013). The sonochemical coating of cotton withstands 65 washing cycles at hospital washing standards and retains its antibacterial properties. *Cellulose*, *20*(3), 1215-1221. doi: 10.1007/s10570-013-9929-z

- Pertile, R. A. N., Andrade, F. K., Alves, C., & Gama, M. (2010). Surface modification of bacterial cellulose by nitrogen-containing plasma for improved interaction with cells. *Carbohydrate Polymers*, 82(3), 692-698. doi: 10.1016/j.carbpol.2010.05.037
- Perveen, N., Bin Muzaffar, S., & Ali Al-Deeb, M. (2021). Exploring human-animal host interactions and emergence of COVID-19: evolutionary and ecological dynamics. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(2), 1417-1425. doi: 10.1016/j.sjbs.2020.11.077
- Petrucci, R. H., Herring, F. G., Madura, J. D., & Bissonnette, C. (2011). *Química general* (10 ed.). Madrid: Pearson.
- Piland, S. G., Gould, T. E., Jesunathadas, M., Wiggins, J. S., McNair, O., & Caswell, S. V. (2019). Protective helmets in sports. In Aleksandar Subic (Ed.), *Materials in Sports Equipment* (2nd ed., pp. 71-121). Duxford - Reino Unido: Woodhead Publishing.
- Power, E. J. (2018). Advanced knitting technologies for high-performance apparel. In John Joseph McLoughlin & Tasneem Sabir (Eds.), *High-performance apparel: Materials, development, and applications* (pp. 113-127). Duxford: Woodhead Publishing.
- Quispe, Z. E. (2020). Situación Epidemiológica de las infecciones asociadas a la atención de salud en el Perú, hasta la SE 31 del 2020. *Boletín epidemiológico del Perú*, 29(SE-34), 159-162.
- Radetić, M., & Marković, D. (2019). Nano-finishing of cellulose textile materials with copper and copper oxide nanoparticles. *Cellulose*, 26(17), 8971-8991. doi: 10.1007/s10570-019-02714-4
- RAE. (2022a). [homepage]. Algodón. España. Acceso el: 03 Ene. 2023. Disponible en: <https://dle.rae.es/algod%C3%B3n?m=form>
- RAE. (2022b). [homepage]. Antimicrobiano, na. Acceso el: 03 Ene. 2023. Disponible en: <https://dle.rae.es/antimicrobiano?m=form>
- RAE. (2022c). [homepage]. Celulosa. Acceso el: 03 Ene. 2023. Disponible en: <https://dle.rae.es/celulosa?m=form>
- RAE. (2022d). [homepage]. Físicoquímico, ca. Acceso el: 03 Ene. 2023. Disponible en: <https://dle.rae.es/fisicoqu%C3%ADmico#HzzsXel>
- RAE. (2022e). [homepage]. Interacción. España. Acceso el: 03 Ene. 2023. Disponible en: <https://dle.rae.es/interacci%C3%B3n?m=form>
- RAE. (2022f). [homepage]. Tejido. Acceso el: 03 Ene. 2023. Disponible en: <https://dle.rae.es/tejido?m=form>
- Raghavendra, P., & Pullaiah, T. (2018). Biomedical imaging role in cellular and molecular diagnostics. In Pongali Raghavendra & Thammineni Pullaiah (Eds.), *Advances in cell and molecular diagnostics* (pp. 85-111). London: Academic Press.
- Rashid, M. M., Simončič, B., & Tomšič, B. (2021). Recent advances in TiO₂-functionalized textile surfaces. *Surfaces and Interfaces*, 22, 100890. doi: 10.1016/j.surfin.2020.100890
- Rezaie, A. B., Montazer, M., & Rad, M. M. (2018). Environmentally friendly low cost approach for nano copper oxide functionalization of cotton designed for antibacterial and photocatalytic applications. *Journal of Cleaner Production*, 204, 425-436. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.337
- Ribitsch, V., & Stana-Kleinscheck, K. (1998). Characterizing textile fiber surfaces with streaming potential measurements. *Textile Research Journal*, 68(10), 701-707. doi: 10.1177/004051759806801001
- Riu, M., Chiarello, P., Terradas, R., Sala, M., Castells, X., Knobel, H., & Cots, F. (2016). Impacto económico de las bacteriemias nosocomiales. Comparación de tres metodologías de

cálculo. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 34(10), 620-625. doi: 10.1016/j.eimc.2015.09.007

Rohani Shirvan, A., & Nouri, A. (2020). Medical textiles. In Shahid Ul-Islam & Bhupendra Singh Butola (Eds.), *Advances in functional and protective textiles* (pp. 291-333). Duxfords, United Kingdom: Woodhead Publishing.

Román, L. E., Amézquita, M. J., Uribe, C. L., Maurtua, D. J., Costa, S. A., Costa, S. M., Keiski, R., Solís, J. L., & Gómez, M. M. (2020). *In situ* growth of CuO nanoparticles onto cotton textiles. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 11(2), 025009. doi: 10.1088/2043-6254/ab8a2f

Román, L. E., Gomez, E. D., Solís, J., & Gómez, M. (2020). Antibacterial cotton fabric functionalized with copper oxide nanoparticles. *Molecules*, 25(24), 5802. doi: 10.3390/molecules25245802

Roshan, P. (2015). *Functional finishes for textiles: improving comfort, performance and protection*. Cambridge: Woodhead Publishing.

Roy Choudhury, A. K. (2017). Finishes for protection against microbial, insect and UV radiation *Principles of textile finishing* (pp. 319-382). United Kingdom: Woodhead Publishing.

Ruiz-Caldas, M.-X., Carlsson, J., Sadiktsis, I., Jaworski, A., Nilsson, U., & Mathew, A. P. (2022). Cellulose nanocrystals from postconsumer cotton and blended fabrics: A study on their properties, chemical composition, and process efficiency. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(11), 3787-3798. doi: 10.1021/acssuschemeng.2c00797

Sabir, T. (2018). Fibers used for high-performance apparel. In John Joseph McLoughlin & Tasneem Sabir (Eds.), *High-performance apparel: Materials, development, and applications* (pp. 7-32). Duxford: Woodhead Publishing.

Sáenz-Trevizo, A., Amézaga-Madrid, P., Pizá-Ruiz, P., Monárrez-Cordero, B., Hernández-Salcedo, P. G., Antúnez-Flores, W., Ornelas-Gutiérrez, C., Solís-Canto, O., Leyva-Porras, C., & Miki-Yoshida, M. (2018). Functional nanostructured oxides: synthesis, properties, and applications. In Ahmed Barhoum & Abdel Salam Hamdy Makhlof (Eds.), *Emerging applications of nanoparticles and architectural nanostructures* (pp. 29-69). Amsterdam: Elsevier.

Saha, J., & Mondal, M. I. H. (2021). Antimicrobial textiles from natural resources: types, properties and processing. In Md. Ibrahim H. Mondal (Ed.), *Antimicrobial textiles from natural resources* (pp. 1-43). Duxford: Woodhead Publishing.

Salem, V. (2010). *Tingimento têxtil: fibras, conceitos e tecnologias*. São Paulo: Blucher: Golden Tecnologia.

Scott, E. A., Bruning, E., Nims, R. W., Rubino, J. R., & Ijaz, M. K. (2020). A 21st century view of infection control in everyday settings: Moving from the germ theory of disease to the microbial theory of health. *American Journal of Infection Control*, 44(11), 1387-1392. doi: 10.1016/j.ajic.2020.05.012

Schaepe, K., Jungnickel, H., Heinrich, T., Tentschert, J., Luch, A., & Unger, W. E. S. (2020). Secondary ion mass spectrometry. In Vasile-Dan Hodoroaba, Wolfgang E. S. Unger & Alexander G. Shard (Eds.), *Characterization of nanoparticles: Measurement processes for nanoparticles* (pp. 481-509). Amsterdam: Elsevier.

Schaller, C. (2022). *Chemical structure and properties*. College of Saint Benedict/Saint John's University: LibreTexts.

- Schindler, W. D., & Hauser, P. J. (2004). *Chemical finishing of textiles*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Sedighi, A., & Montazer, M. (2016). Tunable shaped N-doped CuO nanoparticles on cotton fabric through processing conditions: synthesis, antibacterial behavior and mechanical properties. *Cellulose*, 23(3), 2229-2243. doi: 10.1007/s10570-016-0892-3
- Senthil Kumar, R., & Sundaresan, S. (2013). Mechanical finishing techniques for technical textiles. In M.L. Gulrajani (Ed.), *Advances in the dyeing and finishing of technical textiles* (pp. 135-153). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Shaheen, T. I. (2022). Nanotechnology for modern textiles: highlights on smart applications. *The Journal of The Textile Institute*, 113(10), 2274-2284. doi: 10.1080/00405000.2021.1962625
- Shaheen, T. I., El-Naggar, M. E., Abdelgawad, A. M., & Hebeish, A. (2015). Durable antibacterial and UV protections of in situ synthesized zinc oxide nanoparticles onto cotton fabrics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 83, 426-432. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2015.11.003
- Shaheen, T. I., Fouda, A., & Salem, S. S. (2021). Integration of cotton fabrics with biosynthesized CuO nanoparticles for bactericidal activity in the terms of their cytotoxicity assessment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(4), 1553-1563. doi: 10.1021/acs.iecr.0c04880
- Shahidi, S., Jamali, A., Dalal Sharifi, S., & Ghomi, H. (2017). *In-situ* synthesis of CuO nanoparticles on cotton fabrics using spark discharge method to fabricate antibacterial textile. *Journal of Natural Fibers*, 15(6), 870-881. doi: 10.1080/15440478.2017.1376302
- Shankar, S., Wang, L. F., & Rhim, J. W. (2017). Preparation and properties of carbohydrate-based composite films incorporated with CuO nanoparticles. *Carbohydrate polymers*, 169, 264-271. doi: 10.1016/j.carbpol.2017.04.025
- Sheikh, J., & Bramhecha, I. (2019). Enzymes for green chemical processing of cotton. In Shahid-ul-Islam & B.S. Butola (Eds.), *The impact and prospects of green chemistry for textile technology* (pp. 135-160). Duxford: Woodhead Publishing.
- Shirvanimoghaddam, K., Motamed, B., Ramakrishna, S., & Naebe, M. (2020). Death by waste: Fashion and textile circular economy case. *The Science of the Total Environment*, 718, 137317. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137317
- Shishoo, R. (2015). *Textiles for sportswear*. Cambridge - Reino Unido: Woodhead Publishing.
- Shriver, D. F., Atkins, P. W., & Langford, C. H. (2007). *Química Inorgánica*. Barcelona: Reverté S. A.
- Sibhatu, A. K., Weldegebrieal, G. K., Sagadevan, S., Tran, N. N., & Hessel, V. (2022). Photocatalytic activity of CuO nanoparticles for organic and inorganic pollutants removal in wastewater remediation. *Chemosphere*, 300, 134623. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134623
- Siddiqui, H., Parra, M. R., Pandey, P., Qureshi, M. S., & Haque, F. Z. (2020). Utility of copper oxide nanoparticles (CuO-NPs) as efficient electron donor material in bulk-heterojunction solar cells with enhanced power conversion efficiency. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 5(1), 104-110. doi: 10.1016/j.jsamd.2020.01.004
- Silva, R. M. D., Lopes, A. G., & Santos, C. A. G. (2023). Deforestation and fires in the Brazilian Amazon from 2001 to 2020: Impacts on rainfall variability and land surface temperature. *Journal of Environmental Management*, 326(Pt A), 116664. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116664

- Singh, A. K. (2023). Nanostructured coatings based on metallic nanoparticles as viral entry inhibitor to combat COVID-19. *Sustainable Materials and Technologies*, 35, e00544. doi: 10.1016/j.susmat.2022.e00544
- Singh, B. K., Shaikh, A., Dusane, R. O., & Parida, S. (2020). Copper oxide nanosheets and nanowires grown by one-step linear sweep voltammetry for supercapacitor application. *Journal of Energy Storage*, 31, 101631. doi: 10.1016/j.est.2020.101631
- Singh, S., & Khajuria, R. (2018). Penicillium Enzymes for the Textile Industry. In Vijai Kumar Gupta & Susana Rodriguez-Couto (Eds.), *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering* (pp. 201-215). Amsterdam: Elsevier.
- Sivaramakrishnan, C. N. (2013). The use of surfactants in the finishing of technical textiles. In M.L. Gulrajani (Ed.), *Advances in the dyeing and finishing of technical textiles* (pp. 199-235). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Smith, R. M., Sayen, S., Nuns, N., Berrier, E., & Guillon, E. (2018). Combining sorption experiments and Time of Flight Secondary Ion Mass Spectrometry (ToF-SIMS) to study the adsorption of propranolol onto environmental solid matrices - Influence of copper(II). *The Science of the Total Environment*, 639, 841-851. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.118
- Smtih, A. (2018). The role of filtration textiles within industry. *Filtration+Separation*, 55(1), 28-29. doi: 10.1016/S0015-1882(18)30173-3.
- Stanić, V., & Tanasković, S. B. (2020). Antibacterial activity of metal oxide nanoparticles. In Susai Rajendran, Anita Mukherjee, Tuan Anh Nguyen, Chandraiah Godugu & Ritesh K. Shukla (Eds.), *Nanotoxicity* (1st ed., pp. 241-274). Netherkands: Elsevier.
- Sturdy, A., Basarab, M., Cotter, M., Hager, K., Shakespeare, D., Shah, N., Randall, P., Spray, D., & Arnold, A. (2020). Severe COVID-19 and healthcare-associated infections on the ICU: time to remember the basics? *The Journal of Hospital Infection*, 105(4), 593-595. doi: 10.1016/j.jhin.2020.06.027
- Su, M., Chen, X., Zhang, L., & Min, J. (2020). Synthesis of active graphene with para-ester on cotton fabrics for antistatic properties. *Nanomaterials (Basel)*, 10(6), 1147. doi: 10.3390/nano10061147
- Sze-To, G. N., Yang, Y., Kwan, J. K. C., Yu, S. C. T., & Chao, C. Y. H. (2014). Effects of surface material, ventilation, and human behavior on indirect contact transmission risk of respiratory infection. *Risk Analysis*, 34(5), 818-830. doi: 10.1111/risa.12144
- Tamayo, L., Azocar, M., Kogan, M., Riveros, A., & Paez, M. (2016). Copper-polymer nanocomposites: An excellent and cost-effective biocide for use on antibacterial surfaces. *Materials Science & Engineering, C: Materials for Biological Applications*, 69, 1391-1409. doi: 10.1016/j.msec.2016.08.041
- Tavakoli, A., & Hashemzadeh, M. S. (2020). Inhibition of herpes simplex virus type 1 by copper oxide nanoparticles. *Journal of Virological Methods*, 275, 113688. doi: 10.1016/j.jviromet.2019.113688
- Techtextile. (2020). [homepage]. Application areas. Alemania. Acceso el: 26 Ene. 2021. Disponible en: <https://techtextil.messefrankfurt.com/frankfurt/en/profile.html>
- The Lancet Infectious, D. (2023). Twin threats: climate change and zoonoses. *The Lancet. Infectious diseases*, 23(1), 1. doi: 10.1016/S1473-3099(22)00817-9
- Thomas III, K. J., & Rice, C. V. (2015). Equilibrium binding behavior of magnesium to wall teichoic acid. *Biochimica et Biophysica Acta, Biomembranes*, 1848(10), 1981-1987. doi: 10.1016/j.bbamem.2015.05.003

Tiginyanu, I. M., Lupan, O., Ursaki, V. V., Chow, L., & Enachi, M. (2011). Nanostructures of metal oxides. In P. Bhattacharya, R. Fornari & H. Kamimura (Eds.), *Comprehensive semiconductor science and technology* (1st ed., Vol. 3, pp. 396-479). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.

Toma, H. E. (2016). *Nanotecnologia molecular: materiais e dispositivos*. São Paulo: Blucher.

Travaglio, M., Yu, Y., Popovic, R., Selley, L., Leal, N. S., & Martins, L. M. (2021). Links between air pollution and COVID-19 in England. *Environmental Pollution*, 268(Pt A), 115859. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115859

Tripathi, R., Narayan, A., Bramhecha, I., & Sheikh, J. (2019). Development of multifunctional linen fabric using chitosan film as a template for immobilization of in-situ generated CeO₂ nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 121, 1154-1159. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.10.067

Tsatsakis, A., Petrakis, D., Nikolouzakis, T. K., Docea, A. O., Calina, D., Vinceti, M., Goumenou, M., Kostoff, R. N., Mamoulakis, C., Aschner, M., & Hernandez, A. F. (2020). COVID-19, an opportunity to reevaluate the correlation between long-term effects of anthropogenic pollutants on viral epidemic/pandemic events and prevalence. *Food and Chemical Toxicology*, 141, 111418. doi: 10.1016/j.fct.2020.111418

Türkoğlu, G. C., Sarıışık, A. M., Erkan, G., Yıkılmaz, M. S., & Kontart, O. (2020). Micro- and nano-encapsulation of limonene and permethrin for mosquito repellent finishing of cotton textiles. *Iranian Polymer Journal*, 29(4), 321-329. doi: 10.1007/s13726-020-00799-4

Unger, W. E. S., Wirth, T., & Hodoroaba, V.-D. (2020). Auger electron spectroscopy. In Vasile-Dan Hodoroaba, Wolfgang E. S. Unger & Alexander G. Shard (Eds.), *Characterization of nanoparticles: Measurement processes for nanoparticles* (pp. 373-395). Amsterdam: Elsevier.

Vajpayee, M., Singh, M., Dave, H., & Ledwani, L. (2023). Enzymatic surface modification of banana fabric with cellulase: Characterization and antimicrobial finishing with plant extracts. *Industrial Crops and Products*, 191, 115895. doi: 10.1016/j.indcrop.2022.115895

Van Baarle, D., Bollaerts, K., Del Giudice, G., Lockhart, S., Luxemburger, C., Postma, M. J., Timen, A., Standaert, B., & Vaccines, I. D. i. t. A. P. c. (2020). Preventing infectious diseases for healthy ageing: The VITAL public-private partnership project. *Vaccine*, 38(37), 5896-5904. doi: 10.1016/j.vaccine.2020.07.005

Vandamar Poonguzhali, R., Ranjith Kumar, E., Aruna Devi, N., Srinivas, C., Khalifa, M. E., Abu-Melha, S., & El-Metwaly, N. M. (2022). Natural citric acid assisted synthesis of CuO nanoparticles: Evaluation of structural, optical, morphological properties and colloidal stability for gas sensor applications. *Ceramics International*, 48(18), 26287-26293. doi: 10.1016/j.ceramint.2022.05.311

Varshalovich, D. A., Moskalev, A. N., & Khersonskii, V. K. (1988). *Quantum theory of angular momentum*. New Jersey, USA: World Scientific.

Villalva, C. (2021). *Incorporación de nanopartículas de óxido de cobre en tejidos de algodón para mejorar la solidez al sudor a partir de diferentes métodos textiles: agotamiento, impregnación, agotamiento-impregnación*. (Bachiller - Tesis), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

Vogel, A. (1991). *Química analítica cualitativa*. Buenos Aires, Argentina: Kapelusz.

Voskarides, K. (2022). SARS-CoV-2: tracing the origin, tracking the evolution. *BMC Medical Genomics*, 15(1), 62. doi: 10.1186/s12920-022-01208-w

- Wakelyn, P. J., & French, A. D. (2006). *Cotton fiber chemistry and technology*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Wang, D., Li, K., Zhou, C., lei, L., Rancourt de Mimérand, Y. d., Jin, X., & Guo, J. (2022). Bi₂MoO₆ and Ag nanoparticles immobilized on textile by plasma-derived innovative techniques to generate antimicrobial activity. *Applied Surface Science*, 585, 152591. doi: 10.1016/j.apsusc.2022.152591
- Wang, J., & Mahltig, B. (2022). Treatment of Kynol fiber materials – Part 2: antistatic and water-repellent functionalization. *Communications in Development and Assembling of Textile Products*, 3(1), 62-71. doi: 10.25367/cdatp.2022.3.p62-71
- Wang, L., & Wang, X. (2009). Effect of structure–property relationships on fatigue failure in natural fibres. In Mohsen MirafTAB (Ed.), *Fatigue failure of textile fibres* (pp. 95-132). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Wang, X., Lu, Y., Zhang, Q., Wang, K., Carmalt, C. J., Parkin, I. P., Zhang, Z., & Zhang, X. (2021). Durable fire retardant, superhydrophobic, abrasive resistant and air/UV stable coatings. *Journal of Colloid and Interface Science*, 582(Pt A), 301-311. doi: 10.1016/j.jcis.2020.07.084
- Watts, J. F., & Wolstenholme, J. (2003). *An introduction to surface analysis by XPS and AES*. West Sussex: Wiley.
- Watts, J. F., & Wolstenholme, J. (2020). *An introduction to surface analysis by XPS and AES*. New York, USA: Wiley.
- Wei, Q., Yang, D., Gu, B., & Sun, B. (2021). Numerical and experimental investigation on 3D angle interlock woven fabric under ballistic impact. *Composite Structures*, 266, 113778. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113778
- Weldegebrial, G. K. (2020). Photocatalytic and antibacterial activity of CuO nanoparticles biosynthesized using *Verbascum thapsus* leaves extract. *Optik*, 204, 164230. doi: 10.1016/j.ijleo.2020.164230
- Welker, R. W. (2012). Size analysis and identification of particles. In Rajiv Kohli & K.L. Mittal (Eds.), *Developments in surface contamination and cleaning* (pp. 179-213). Northridge: Elsevier.
- WHO. (2023). WHO coronavirus disease (COVID-19) dashboard. Suiza. Acceso el: 04 Ene. 2023. Disponible en: <https://covid19.who.int/>
- Wu, T., Perrings, C., Kinzig, A., Collins, J. P., Minter, B. A., & Daszak, P. (2017). Economic growth, urbanization, globalization, and the risks of emerging infectious diseases in China: A review. *Ambio*, 46(1), 18-29. doi: 10.1007/s13280-016-0809-2
- Xin, J. H., & Wang, X. W. (2018). Insect-repellent textiles. In Menghe Miao & J. H. Xin (Eds.), *Engineering of high-performance textiles* (1st ed., pp. 335-348). Duxford: Woodhead Publishing.
- Yang, S., Chen, L., Liu, S., Hou, W., Zhu, J., Zhao, P., & Zhang, Q. (2021). Facile and sustainable fabrication of high-performance cellulose sponge from cotton for oil-in-water emulsion separation. *Journal of Hazardous Materials*, 408, 124408. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124408
- Yang, W., Wang, J., Ma, W., Dong, C., Cheng, G., & Zhang, Z. (2016). Free-standing CuO nanoflake arrays coated Cu foam for advanced lithium ion battery anodes. *Journal of Power Sources*, 333, 88-98. doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.09.154

- Ye, Z., Li, S., Zhao, S., Deng, L., Zhang, J., & Dong, A. (2020). Textile coatings configured by double-nanoparticles to optimally couple superhydrophobic and antibacterial properties. *Chemical Engineering Journal*, 420(Part 2), 127680. doi: 10.1016/j.cej.2020.127680
- Yetisen, A. K., Qu, H., Manbachi, A., Butt, H., Dokmeci, M. R., Hinestroza, J. P., Skorobogatiy, M., Khademhosseini, A., & Yun, S. H. (2016). Nanotechnology in textiles. *ACS Nano*, 10(3), 3042-3068. doi: 10.1021/acs.nano.5b08176
- Yoosefi, A., Wang, R., & Xu, R. (2015). Simple method of deposition of CuO nanoparticles on a cellulose paper and its antibacterial activity. *Chemical Engineering Journal*, 262, 999-1008. doi: 10.1016/j.cej.2014.09.096
- Yu, M., Wang, Q., Yang, W., Xu, Y., Zhang, M., Deng, Q., & Liu, G. (2019). Facile fabrication of magnetic, durable and superhydrophobic cotton for efficient oil/water separation. *Polymers (Basel)*, 11(3), 442. doi: 10.3390/polym11030442
- Yurdakal, S., Garlisi, C., Özcan, L., Bellardita, M., & Palmisano, G. (2019). (Photo)catalyst characterization techniques. In Giuseppe Marci & Leonardo Palmisano (Eds.), *Heterogeneous photocatalysis: Relationships with heterogeneous catalysis and perspectives* (1st ed., pp. 87-152). Amsterdam: Elsevier.
- Zarraf, D., Montazer, M., & Sadeghian Maryan, A. (2017). *In-situ* synthesis of nano-copper on denim garment along with nano-clay for antibacterial and decoloration purposes. *Cellulose*, 24(9), 4083-4095. doi: 10.1007/s10570-017-1378-7
- Zhang, H., Zhu, L., & Sun, R. (2014). Structure and properties of cotton fibers modified with titanium sulfate and urea under hydrothermal conditions. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 9(1), 67-75. doi: 10.1177/155892501400900108
- Zhang, J., Xiang, G., Liu, Y., Zhang, J., Peng, W., Zhou, Y., Yue, Z., Zhang, X., Song, C., Jin, Y., Wang, P., Wang, H., & Zhao, Y. (2023). Preparation of CuO films at different sputtering powers and the effect of operating temperatures on the photovoltaic characteristics of p-CuO/n-Si heterojunction. *Vacuum*, 209, 111769. doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111769
- Zhao, Y., Xing, W., Ma, X., Yu, R., & Meng, F. (2022). Atomic and electronic structures of the interface and twin boundaries in epitaxial CuO films on a ZnO substrate. *Materials Today Communications*, 33, 105022. doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.105022
- Zingg, W., Holmes, A., Dettenkofer, M., Goetting, T., Secci, F., Clack, L., Allegranzi, B., Magiorakos, A.-P., & Pittet, D. (2015). Hospital organisation, management, and structure for prevention of health-care-associated infection: a systematic review and expert consensus. *The Lancet Infectious Diseases*, 15(2), 212-224. doi: 10.1016/s1473-3099(14)70854-0
- Zoolfakar, A. S., Rani, R. A., Morfa, A. J., O'Mullane, A. P., & Kalantar-zadeh, K. (2014). Nanostructured copper oxide semiconductors: a perspective on materials, synthesis methods and applications. *Journal of Materials Chemistry C*, 2(27), 5247-5270. doi: 10.1039/c4tc00345d
- Zorrilla-Vaca, A., & Escandón-Vargas, K. (2017). La importancia del control y prevención de enfermedades infecciosas en anestesiología. *Revista Colombiana de Anestesiología*, 45, 69-77. doi: 10.1016/j.rca.2017.09.002

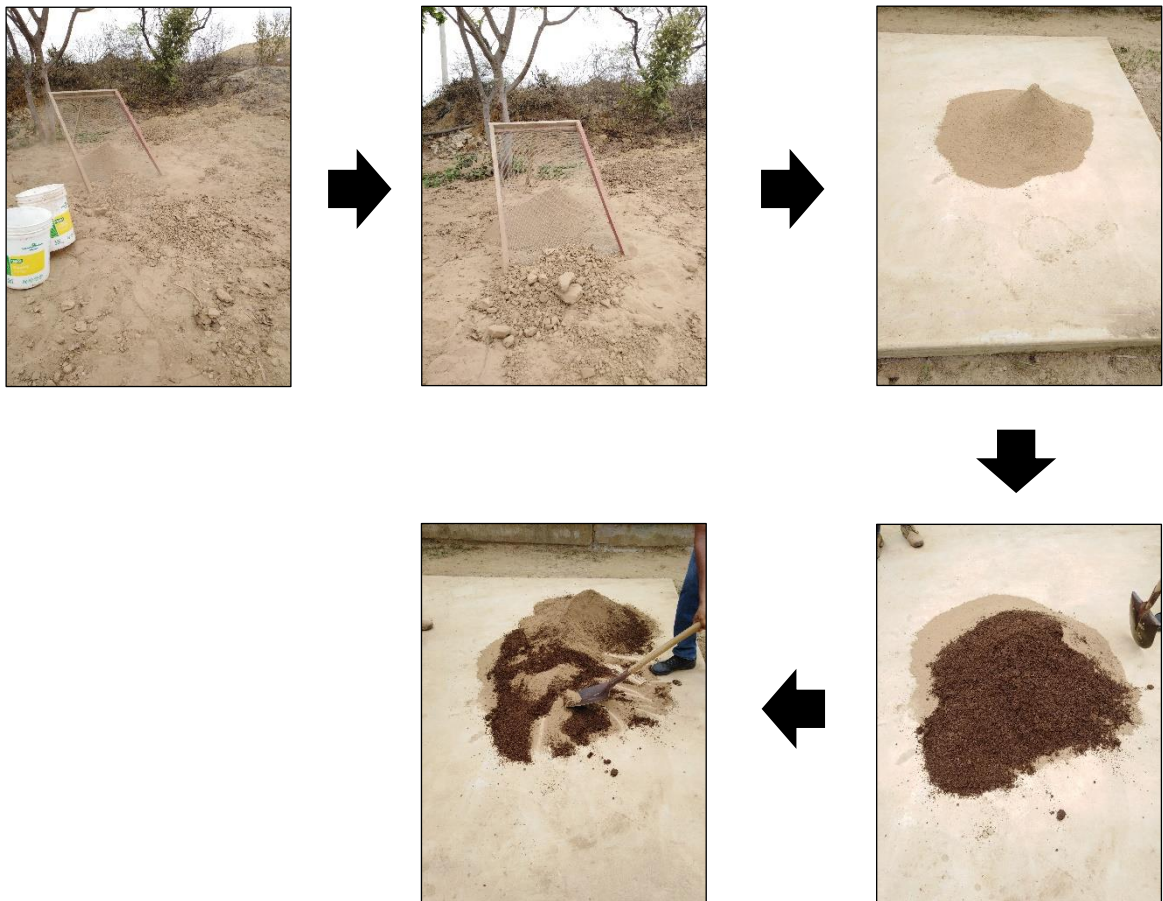
ANEXOS

Anexo A – Pruebas preliminares de biodegradabilidad del tejido

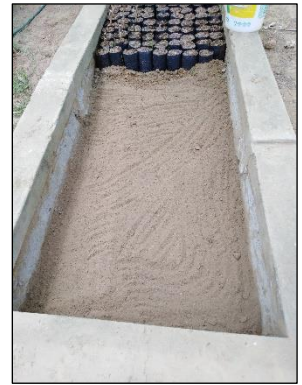
Lugar: Taller de enseñanza e investigación – Vivero forestal – Universidad Nacional de Tumbes, Tumbes.

Método: ISO 11721-1 con modificaciones.

a) Preparación de tierra























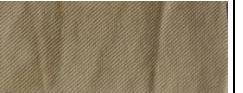



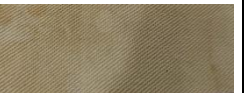


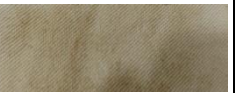



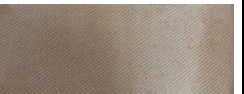
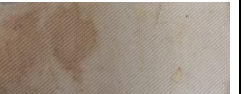

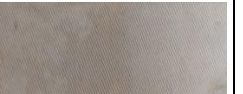





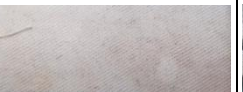













b) Preparación del biohuerto



c) Enterramiento de tejidos y riego



d) Resultados de biodegradabilidad

Día	Muestra no-funcionalizada	Muestra A5		Muestra N5		Muestra S5	
		Sin lavar	25 lavadas	Sin lavar	25 lavadas	Sin lavar	25 lavadas
1							
3							
9							
18							
39							
59							
79							
109	-----						-----

Anexo B – Matriz de consistencia

Título: Estudio de las interacciones físico químicas del algodón y los óxidos de cobre en los textiles funcionalizados con propiedades antimicrobianas					
Identificación y Descripción de Problema de Estudio	Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables y dimensiones	Metodología
Existe en la literatura pocas aportaciones acerca de la forma en la que posiblemente interactúan la celulosa del algodón de un textil antimicrobiano con los óxidos de cobre aplicados sobre el mismo textil	<u>Problema general</u> ¿Cuál es la interacción físico-química entre la celulosa de algodón y óxidos de cobre (CuO _x) de un tejido antimicrobiano obtenido por el método de teñido de agotamiento funcionalizado con estos mismos óxidos?	<u>Objetivo general</u> Estudiar la interacción físico-química entre la celulosa de algodón y óxidos de cobre (CuO _x) de un tejido antimicrobiano obtenido por el método de teñido de agotamiento funcionalizado con estos mismos óxidos.	<u>Hipótesis general</u> Existe un tipo de interacción entre la celulosa de algodón y óxidos de cobre (CuO _x) de un tejido antimicrobiano obtenido por el método de teñido textil de agotamiento funcionalizado con estos mismos óxidos que permite que la propiedad antimicrobiana persista luego de ciclos de lavados.	<u>Variable independiente</u> Interacción físico-química entre la celulosa del algodón y óxidos de cobre (CuO _x). DIMENSIONES: - Características elementales, superficiales y morfológicas - Resistencia a los lavados	<u>Tipo de investigación:</u> Básica <u>Nivel de investigación:</u> Descriptivo, Explicativo <u>Diseño:</u> Experimental

	<u>Problemas específicos</u>	<u>Objetivos específicos</u>	<u>Hipótesis específicas</u>	<u>Variable dependiente</u>	<u>Población y muestra:</u>
	<p>1). ¿Es factible funcionalizar <i>in situ</i> tejidos de algodón con CuO_x por el método de teñido de agotamiento utilizando sales precursoras de acetato, nitrato y sulfato de cobre para obtener tejidos antimicrobianos?</p> <p>2). ¿Existe relación entre las características colorimétricas, tanto del tejido no-funcionalizado como de los tejidos obtenidos durante proceso de funcionalización con CuO_x, y la presencia de cobre en los tejidos?</p> <p>3). ¿En qué medida las caracterizaciones elementales, superficiales y morfológicas del tejido no-funcionalizado y los tejidos obtenidos en el proceso</p>	<p>1). Funcionalizar <i>in situ</i> tejidos de algodón con CuO_x por el método de teñido de agotamiento utilizando sales precursoras de acetato, nitrato y sulfato de cobre para obtener tejidos antimicrobianos.</p> <p>2). Determinar la relación que existe entre las características colorimétricas, tanto del tejido no-funcionalizado como de los tejidos obtenidos durante proceso de funcionalización con CuO_x, y la presencia de cobre en los tejidos.</p> <p>3). Determinar la contribución de las caracterizaciones elementales, superficiales y morfológicas del tejido no-funcionalizado y los tejidos obtenidos en el proceso de</p>	<p>1). Si es factible funcionalizar <i>in situ</i> tejidos de algodón con CuO_x por el método de teñido de agotamiento utilizando sales precursoras de acetato, nitrato y sulfato de cobre para obtener tejidos antimicrobianos.</p> <p>2). Existe relación directa entre las características colorimétricas, tanto del tejido no-funcionalizado como de los tejidos obtenidos durante proceso de funcionalización con CuO_x, y la presencia de cobre en los tejidos.</p> <p>3). Las caracterizaciones elementales, superficiales y morfológicas del tejido no-funcionalizado y los tejidos obtenidos en el proceso de</p>	<p>Propiedad antimicrobiana de los tejidos funcionalizados con nanopartículas de CuO_x.</p> <p>DIMENSIONES:</p> <p>- Porcentaje de reducción bacteriana</p>	<p>El universo de la población y muestras serán textiles con propiedades antimicrobianas funcionalizadas con óxidos de cobre a partir de sales de acetato, nitrato y sulfato de cobre</p> <p><u>Técnicas de recolección de datos:</u></p> <p>- Observación</p> <p><u>Instrumentos de recolección de datos:</u></p> <p>-Espectrómetro de reflectancia</p> <p>-Espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente</p> <p>-Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X</p> <p>-Microscopía electrónica de barrido</p> <p>-Normas técnicas internacionales</p>

	<p>de funcionalización con CuO_x contribuyen con el estudio de la interacción físico-química entre los óxidos de cobre y la celulosa de la fibra de algodón?</p> <p>4). ¿Cuál es la resistencia de la propiedad antimicrobiana de los tejidos funcionalizados con CuO_x frente a las pruebas de lavado doméstico?</p>	<p>funcionalización con CuO_x con el estudio de la interacción físico-química entre los óxidos de cobre y la celulosa de la fibra de algodón.</p> <p>4). Determinar la resistencia de la propiedad antimicrobiana de los tejidos funcionalizados con CuO_x frente a las pruebas de lavado doméstico.</p>	<p>funcionalización con CuO_x facilitan el estudio de la interacción físico-química entre los óxidos de cobre y la celulosa de la fibra de algodón.</p> <p>4). La propiedad antimicrobiana de los tejidos funcionalizados con CuO_x tiene buena resistencia frente a las pruebas de lavado doméstico.</p>		<p><u>Técnicas e instrumentos de análisis y procesamiento de datos:</u></p> <p>-Se aplicará la estadística descriptiva (cuadros y gráficos estadísticos).</p> <p>-Curvas espectrales serán analizados con el software Color Tools versión 1.1.</p> <p>-Los controles de calidad se analizarán de forma comparativa con las escalas de grises de cambio y transferencia de color.</p>
--	---	--	---	--	---