



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
PUEBLA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

COLEGIO DE INGENIERÍA TEXTIL

**ADSORCIÓN *IN SITU* DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA EN
HILOS DE ALGODÓN CON ACTIVIDAD ANTIBACTERIAL**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA TEXTIL

PRESENTA:

DE JESÚS RODRÍGUEZ KARLA ITZAHUARI

DIRECTORES:

DR. JOSÉ FRANCISCO SÁNCHEZ RAMÍREZ

DRA. JOSEFINA AGUILA LÓPEZ

PUEBLA, PUE. 2025



BUAP

Oficio No. SAC/1416/2025

**C. De Jesús Rodríguez Karla Itzahuari -201908438-
Pasante de la carrera de ingeniería Textil
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de esta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“ADSORCIÓN IN SITU DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA EN HILOS DE ALGODÓN CON ACTIVIDAD ANTIBACTERIAL”

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como director de tema al Dr. José Francisco Sánchez Ramírez.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de 21 a 17 de septiembre de 2025

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director



M'ACGZ/M'VGL/barv
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

Facultad
de Ingeniería

Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
222 229 55 00 Ext. 7610

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P r e s e n t e.

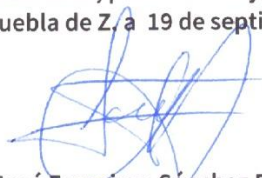
El que suscribe: Dr. José Francisco Sánchez Ramírez, director del tema de tesis:

“ADSORCIÓN IN SITU DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA EN HILOS DE ALGODÓN CON ACTIVIDAD ANTIBACTERIAL”

Presentada por la C. Karla Itzahuari De Jesús Rodríguez -201908438-, pasante del Colegio de Ingeniería Textil, y en atención al oficio No. SAC/1416/2025 con fecha de emisión 17 de septiembre de 2025, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 19 de septiembre de 2025



Dr. José Francisco Sánchez Ramírez
Director de Tema

D'JFSR/BARV
C.c.p. Archivo

AGRADECIMIENTOS

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, a la Facultad de Ingeniería y al Colegio de Ingeniería Textil por permitirme ser parte de esta gran institución y de esta manera poder desarrollarme de forma académica y profesional.

Al Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA) del IPN por darme las facilidades para desarrollar y terminar mi proyecto de tesis.

A mis profesores por compartir su conocimiento y así poder formarme tanto académicamente y también como profesional.

RESUMEN

En este trabajo de tesis se presentan los resultados de la síntesis *in situ* de nanopartículas de plata para desarrollo de hilos multifuncionales. A través de la síntesis *in situ* de nanopartículas de plata en hilos de algodón fue posible el desarrollo de hilos con propiedad antibacterial. La síntesis de las nanopartículas de plata fue realizada utilizando diferentes concentraciones de AgNO_3 . Utilizando las técnicas de Espectroscopia UV-Vis, Microscopía Electrónica de Barrido, Espectroscopia de Energía Dispersa y Difracción de rayos-X fue posible caracterizar las propiedades de las nanopartículas de plata sobre el hilo textil: formación, tamaño, dispersión y composición. La propiedad antibacteriana del nuevo nanohilo de Ag desarrollado fue evaluado a través de halos de inhibición contra la bacteria *Staphylococcus aureus*. Los resultados revelan la formación *in situ* de partículas cristalinas de plata en escala nanométrica (menores a 20 nm) ancladas uniformemente en la superficie de los hilos de algodón. Nanohilos de Ag con propiedades antibacteriales fueron exitosamente desarrollados.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
JUSTIFICACIÓN	5
HIPOTESIS	6
OBJETIVOS	7
OBJETIVO GENERAL	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
CAPÍTULO 2	8
2.1 Marco Teórico	9
2.2 Hilos de algodón	10
2.2.1 Estructura y composición	10
2.2.2 Tipos de hilo para hilar	17
2.2.3 Pretratamiento a hilos de algodón	19
2.2.4 Uso de los hilos de algodón en la industria textil	20
2.3 Nanopartículas de Plata (NPs de Ag)	22
2.3.1. Propiedades y características relevantes	22
2.3.2. Métodos de síntesis de NPs de Ag	24
2.3.3 Actividad antibacteriana de las NPs de Ag	26
2.3.4 Mecanismos de acción antibacterial de las NPs de Ag	27
2.5 <i>Staphylococcus aureus</i>	30
2.6 Métodos de evaluación de la actividad antibacterial	31
2.6.1 Método de difusión en agar	31

2.7	Uso de nanopartículas de plata en hilos para aplicación textil.....	32
2.7.1	Nanohilos de algodón.....	34
2.8	Métodos de adsorción de NPs en hilos de algodón.....	35
2.9	Técnicas de caracterización de los hilos textiles funcionalizados	35
2.9.1	Espectroscopía UV-Vis	36
2.9.2	Microscopia electrónica de barrido (SEM)	40
2.9.3	Espectroscopía de Energía Dispersa (EDS)	41
2.9.4	Difracción de rayos X.....	42
CAPÍTULO 3	46
3.	Metodología	47
3.1	Materiales y Métodos.....	47
3.2	Pretratamiento al hilo de algodón	47
3.2.1	Descruce y blanqueo	47
3.3	Adsorción <i>in situ</i> de NPs de Ag en hilos de algodón.....	49
3.3.1	Lavado de los hilos de algodón	49
3.3.2	Activación química superficial de los hilos (Celulosa-Sodio)	50
3.3.3	Síntesis <i>in situ</i> de nanopartículas de plata sobre hilos de algodón	51
3.3.4	Actividad antibacterial de los hilos de algodón/NPs Ag.....	53
CAPÍTULO 4	54
4.	Resultados y discusión	55
4.1	Activación química de los hilos de algodón	55
4.2	Formación <i>in situ</i> de nanopartículas de plata sobre los hilos de algodón	56
4.3	Caracterización de los nanohilos de Ag.....	57
4.3.1	Espectroscopia UV-Visible	57

4.3.2 Microscopia electrónica de barrido (SEM)	59
4.3.3 Espectroscopia de energía dispersa (EDS)	61
4.3.4 Difracción de rayos X.....	62
4.4 Propiedades funcionales de los nanotextiles	65
4.4.3 Propiedad antibacterial de nanohilos/NPs-Ag.....	65
CAPÍTULO 5	67
5.1 Conclusiones	68
BIBLIOGRAFÍA	69

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de los tipos de hilos según su grado de torsión a) de una capa y b) varias capas (Wen et al., 2021).	15
Figura 2. Ilustración esquemática de los métodos de preparación de partículas (Sánchez Ramírez, 2004).	25
Figura 3. Representación esquemática de los protocolos de ensayo de difusión en disco para la determinación de la actividad antimicrobiana (Hossain, 2024). ..	32
Figura 4. Espectro Electromagnético.	37
Figura 5. Espectrofotómetro de UV-Vis.	38
Figura 6. Resonancia plasmónica localizada en una esfera metálica (Chouhan, 2018).	39
Figura 7. Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) marca: Vega Tescan, modelo: TS5136SB.	41
Figura 8. Esquema representativo de la Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS).	42
Figura 9. Difracción de rayos X por un cristal.	44
Figura 10. Proceso de descruce de los hilos de algodón.	48
Figura 11. Proceso de blanqueo de los hilos de algodón.	49
Figura 12. Proceso de lavado de los hilos algodón.	50
Figura 13. Imágenes de la etapa de activación química superficial de los hilos de algodón con NaOH.	51

Figura 14. Imágenes de las etapas de la síntesis in situ de nanopartículas de Ag sobre los hilos de algodón: (1) hilos en las soluciones de AgNO ₃ , (2) hilos en las soluciones reductoras, y (3) hilos durante el tratamiento térmico a 75 °C.	52
Figura 15. Esquema del arreglo experimental para la determinación de la actividad antimicrobiana de los nanohilos de Ag contra S. aureus.	53
Figura 16. Hilos de algodón sin tratamiento y activado químicamente.	56
Figura 17. Muestras de hilos de algodón con/sin nanopartículas de Ag, a diferentes concentraciones de AgNO ₃ : a) 0.010M, b) 0.005M y c) 0.001M.	57
Figura 18. Espectro UV-Vis de NPs de Ag, utilizando una concentración de 0.01M de AgNO ₃	58
Figura 19. Micrografías SEM de nanohilos de Ag utilizando diferentes concentraciones de AgNO ₃ : a) 0.010M, b) 0.005M y c) 0.001M.	60
Figura 20. Espectros EDS de nanohilos de Ag obtenidos con diferentes concentraciones de AgNO ₃ : a) 0.010M y c) 0.001M.	62
Figura 21. Difractogramas de rayos X del (a) hilo de algodón sin nanopartículas y (b) nanohilo de Ag utilizando la concentración de 0.01M de AgNO ₃	64
Figura 22. Actividad antibacteriana de hilos de algodón: a) sin NPs de Ag y b) con NPs Ag.	65

Índice de Tablas

Tabla 1. Caracterización del hilo (Hari, 2019).	11
Tabla 2. Valores del coeficiente de empaquetamiento para varios hilos (Hari, 2019).	13
Tabla 3. Volumen específico de los distintos tipos de hilo (Hari, 2019).....	16
Tabla 4. Mecanismo antimicrobiano de las NPs de Ag contra varios tipos de bacterias (Qing <i>et al.</i> , 2018).....	28

CAPÍTULO 1



INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevos tratamientos en tejidos textiles ha emergido como un campo de investigación de gran relevancia, impulsado por la creciente demanda de materiales con propiedades avanzadas. Específicamente, con la creciente sensibilización sobre la salud y la higiene personal, los textiles con propiedades antimicrobianas están emergiendo como un sector atractivo tanto para fabricantes como para investigadores (Giannossa *et al.*, 2013; Vigo & Benjaminson, 1981).

Los agentes antimicrobianos son empleados en textiles para prevenir tres problemas importantes: proteger a los tejidos de la degradación (cambios de color, manchas y el deterioro de las fibras), combaten la aparición de olores desagradables, y reducen los riesgos potenciales para la salud asociados al crecimiento microbiano en los tejidos (Dastjerdi & Montazer, 2010; Giannossa *et al.*, 2013; Ren *et al.*, 2008). Específicamente, las fibras poliméricas naturales, son altamente propensas a la acumulación y proliferación de microorganismos, y dado que su lavado no es eficaz, los microorganismos se mantienen durante largos periodos, lo que resulta en una reducción de la calidad del tejido textil y al tener contacto con el cuerpo humano estos microorganismos tienen un ambiente idóneo (gran superficie, retención de oxígeno, humedad, calor y nutrientes de exudados), para su crecimiento (Dev *et al.*, 2008). Por eso, se están desarrollando diversas técnicas de acabado y desinfección antibacterial para todo tipo de textiles, desde aquellos en el ámbito hospitalario (como ropa médica, prendas de protección y vendajes) hasta la ropa de uso diario y los textiles del hogar.

En general, las propiedades antimicrobianas pueden conferirse a los materiales textiles mediante agentes funcionales incorporados química o físicamente a las fibras o tejidos. Se han probado múltiples compuestos químicos para conferir la actividad antimicrobiana (Giannossa *et al.*, 2013), abarcando desde sustancias muy simples, como halógenos, hasta compuestos muy complejos como sales inorgánicas, yodóforos organometálicos, fenoles y trifenoles, sales de amonio, compuestos nitro, urea y compuestos relacionados, derivados de formaldehído y aminas (Tania *et al.*, 2018).

Sin embargo, en las últimas décadas, se ha interrumpido el uso de la mayor parte de agentes antimicrobianos derivado a la poca información de sus propiedades de su bioactividad y sus posibles efectos nocivos o tóxicos.

A diferencia de compuestos convencionales utilizados, que se han empleado en los procesos de acabado textil como agentes antibacterianos, las partículas con tamaño nanométrico representan una nueva alternativa, ya que proporcionan nuevos mecanismos de bioactividad y permiten la modificación multifuncional de los textiles. Las nanopartículas metálicas como son las nanopartículas de plata (NPs de Ag) presentan propiedades de biocompatibilidad y actividad antimicrobiana, su gran área superficial y tamaño, les permite interactuar eficazmente con microorganismos sin causar una toxicidad excesiva (He *et al.*, 2003).

Las NPs de Ag han ganado un enfoque principal entre las nanopartículas con actividad antimicrobiana, debido a su fuerte y amplio espectro de actividad antimicrobiana, ayudado a inhibir el crecimiento de una amplia variedad de microorganismos, incluidos hongos, virus y bacterias. Además de ayudar a resolver el grave problema de la resistencia a los antibióticos (Loo *et al.*, 2018).

En la actualidad, la síntesis *in situ* de NPs de Ag es el mejor método para el crecimiento de nanopartículas directamente sobre la superficie textil, ya que hay muy pocas posibilidades de agregación, donde la fibra de algodón puede actuar como plantilla para estabilizar y controlar el crecimiento de las NPs de Ag (Guo *et al.*, 2014). Además de ofrecer un efecto duradero y una excelente durabilidad al lavado, en comparación con otros métodos de síntesis.

En este trabajo se presentan los resultados de la síntesis *in situ* de nanopartículas de plata sobre hilos de algodón para desarrollar nuevos tejidos multifuncionales con propiedades antibacteriales. Una vez incorporado las nanopartículas de plata a los hilos, fue necesario modificar la energía superficial del nanohilo en conjunto, dicho proceso también se describe en esta tesis. Se incluyen las

técnicas de caracterización de las NPs de Ag sobre el hilo de algodón, así como la evaluación de actividad antibacterial contra *Staphylococcus aureus*.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En estos últimos años la industria textil a buscado innovar para satisfacer las exigencias de los consumidores, las cuales no solo incluyen textiles con características de comodidad y estética, sino también características funcionales avanzadas. Dentro de estas, la actividad antimicrobiana ha ganado una gran importancia, particularmente en situaciones donde la higiene y la prevención de infecciones son críticas. No obstante, el desarrollo de textiles con propiedades antimicrobianas efectivas y duraderos presenta desafíos significativos.

En la actualidad, los textiles de algodón son propensos al crecimiento de microorganismos como las bacterias y hongos. Esta proliferación no solo genera olores desagradables y degradación del material, disminuyendo su vida útil, sino que también puede ser una fuente de contaminación y un riesgo para la salud en entornos sensibles como hospitales, clínicas o incluso en el uso cotidiano de prendas deportivas y ropa interior. Los métodos convencionales de desinfección suelen requerir lavados frecuentes a elevadas temperaturas o la aplicación de agentes químicos agresivos que generan residuos contaminantes.

Si bien existen diversos agentes antimicrobianos, las nanopartículas de plata han demostrado ser altamente efectivas debido a su amplio espectro de acción contra bacterias y hongos, su toxicidad relativamente baja para los humanos y su estabilidad, no obstante, la funcionalización de los hilos de algodón con NPs de Ag presenta retos técnicos. La durabilidad de la actividad antimicrobiana después de múltiples ciclos de lavado es una preocupación principal, ya que una mínima fijación puede resultar en la liberación de las nanopartículas al medio ambiente (con principales impactos ecológicos) y una rápida pérdida de la funcionalidad deseada. Además, asegurar una distribución homogénea de las NPs de Ag en los hilos de algodón y optimizar la

cantidad necesaria para una efectividad óptima sin comprender las propiedades inherentes del tejido (como la transpirabilidad, suavidad y la resistencia mecánica) es crucial.

JUSTIFICACIÓN

La creciente preocupación por la resistencia antimicrobiana y la necesidad de soluciones innovadoras en el sector textil están impulsando la búsqueda de materiales con actividad antibacteriana intrínseca.

El algodón es un material ampliamente con propiedades únicas como suavidad, transpirabilidad y alta capacidad de absorción. Es una fibra natural obtenida de las semillas de la planta de algodón y es ampliamente utilizado en la industria textil para la fabricación de distintos tipos de prendas y tejidos para aplicaciones médicas, hogar y moda. No obstante, su estructura y composición lo hacen vulnerable a la proliferación de microorganismos. Dando lugar a problemas de higiene, olores desagradables, deterioro del material e infecciones en entornos clínicos, infecciones. Por lo que la funcionalización del algodón con agentes químicos tradicionales ha buscado conferir propiedades antibacterianas deseables al algodón. Sin embargo, los desafíos vinculados a su aplicación han sobrepasado estos beneficios, originando problemas de toxicidad y riesgos a la salud humana, un impacto negativo en el medio ambiente, durabilidad restringida y modificaciones en las características del algodón.

En contraste, las NPs de Ag poseen una fuerte y extensa actividad antimicrobiana que funciona alterando las membranas de las células bacterianas, produciendo especies reactivas de oxígeno e inhiben la replicación del ADN y la síntesis de proteínas. Así pues, las NPs de Ag busca otorgar a los tejidos de algodón una capacidad inherente y duradera para inhibir el crecimiento y la proliferación de bacterias, sin comprometer las características intrínsecas del material textil.

En este escenario, la capacidad de funcionalización de hilos de algodón con NPs de Ag se manifiesta no solo como una innovación científica, sino como una exigencia para crear textiles con valor añadido que contribuyan a mejorar la higiene y reducir la propagación de infecciones, además reducir el uso de químicos antimicrobianos convencionales, extender la durabilidad de los textiles e impulsar la innovación en la industria textil, aportando al conocimiento científico en el área textil y la nanotecnología, sentando las bases para futuros desarrollos y aplicaciones de nuevos nanotextiles funcionales.

HIPOTESIS

Los textiles, especialmente de algodón son ampliamente utilizados en diversos sectores por su suavidad, capacidad para transpirar y absorción. Sin embargo, son susceptibles al crecimiento de bacterias, lo que ocasiona problemas de higiene, olores y riesgo de infecciones. Por lo que la incorporación de NPs de Ag a hilos de algodón generará en un material nanotextil con actividad antibacterial efectiva y duradera contra un amplio espectro de bacterias, sin comprometer las propiedades físicas del algodón.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Síntesis *in situ* de nanopartículas de plata en hilos de algodón y su evaluación antibacterial.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Síntesis controlada de nanopartículas de plata en hilos utilizando el método de reducción química *in situ*.

Caracterización de las propiedades estructurales y ópticas de las nanopartículas de plata mediante la Espectroscopía UV-Vis, Microscopía electrónica de barrido (SEM), Espectroscopia de EDS, Difracción de R-X.

Evaluar la capacidad antimicrobiana de los hilos de algodón funcionalizados con NPs de Ag frente a la cepa bacteriana *Staphylococcus aureus* a través de ensayos cualitativos *in vitro*.

CAPÍTULO 2



2.1 Marco Teórico

El desarrollo de la nanotecnología en la industria textil está en constante avance y expansión, pasando de la investigación de laboratorio a la comercialización de productos textiles con propiedades mejoradas. Los diversos materiales textiles incluyen fibras como el algodón, que es una de las fibras naturales más popular y ampliamente utilizada, facilita la transpirabilidad, regula la temperatura corporal, es suave y absorbente, lo que lo convierte en uno de los materiales más utilizados en la industria textil. Sin embargo, es susceptible al ataque de bacterias que se adhieren y proliferan en él, lo que puede causar su degradación y deformación, además su uso se ve seriamente afectado por las severas condiciones de almacenaje. Por lo tanto, a menudo es necesario someterlas a varios tratamientos para eliminar sus desventajas. Para modificar sus características, los materiales textiles de algodón a menudo suelen requerir un tratamiento químico. Aunque recientemente, los textiles han ganado mayor resistencia mecánica y resistencia a las arrugas debido a tecnologías emergentes como el proceso de planchado permanente y los agentes de acabado (Gokarneshan, 2018). La nanotecnología ha surgido como una novedosa alternativa de fibras textiles conteniendo nanopartículas con mejores propiedades de resistencia al desgaste, manchas, arrugas y microorganismos patógenos. Particularmente, se consideran a las nanopartículas de plata (NPs de Ag) como una de las nanopartículas con mayor actividad antimicrobiana en acabados textiles (Hebeish *et al.*, 2011). Su actividad antimicrobiana es inversamente proporcional con su tamaño a escala nanométrica (Rai *et al.*, 2008). Esto se explica por la mayor área superficial disponible para el contacto con las células bacterianas y, por lo tanto, el número de interacciones en comparación con las partículas relativamente más grandes (Jiang *et al.*, 2009; Morones *et al.*, 2005).

Hay métodos para producir nanoacabados en los materiales textiles utilizando diferentes tipos de nanopartículas *ex situ* e *in situ* (Joshi & Bhattacharyya, 2011). El nanoacabado *ex situ* involucra dos pasos, la síntesis de nanopartículas y su posterior anclaje sobre la superficie de las fibras textiles. El método *in situ* se basa en un solo paso, la activación química de las fibras textiles para crear sitios reactivos de enlace

con los precursores moleculares o atómicos y síntesis simultánea de las nanopartículas. En ambos casos, es necesario aplicar posteriormente un tratamiento de fijación a través de un proceso de curado para que las nanopartículas sean ancladas fuertemente sobre la superficie textil (Li *et al.*, 2008). Este proceso se lleva a cabo normalmente mediante la aplicación de un tratamiento térmico, el cual induce el anclaje fuerte de las nanopartículas sobre la superficie textil (Lee & Jeong, 2004). El método del nanoacabado *in situ* presenta la ventaja de ser fácilmente escalable, y por lo tanto puede ser desarrollado tanto a nivel laboratorio como a nivel industrial. Este es un aspecto a tener en cuenta, ya que es de gran importancia no sólo el desarrollo de textiles funcionales con diferentes aplicaciones, sino la posibilidad de producirlos a gran escala y así conseguir que sean accesibles para el público.

2.2 Hilos de algodón

2.2.1 Estructura y composición

Los hilos están formados de fibras entrelazadas, tales como fibras de corta longitud y filamentosas, que se tuercen juntas alcanzando una gran longitud aptas para diversos productos finales (Hari, 2019). Las características del hilo y la efectividad de su procesamiento están relacionadas con las propiedades de las fibras de algodón que lo componen (Y. Guo *et al.*, 2010), tales como es buena resistencia específica a la tracción y una elevada flexibilidad (Lawrence, 2003).

Algunos de los parámetros utilizados para caracterizar un hilo se enlistan en la siguiente Tabla 1:

Tabla 1. Caracterización del hilo (Hari, 2019).

Parámetros	
Parámetros dimensionales	Densidad lineal
	Diámetro
	Número de filamento en sección transversal
Parámetros estructurales	Torción por cm
	Densidad de envoltura
	Contenido del núcleo
	Relación núcleo/vaina
Tratamiento especial	
Parámetros de la fibra	Longitud
	Densidad lineal
	Rizado
	Forma de la sección transversal

2.2.1.1 Densidad lineal

La densidad lineal, el título del hilo o el número de hilos y el tamaño del hilo son indicativos de la «finura» de un hilo. La finura de un hilo o una fibra no puede expresarse en términos de diámetro, ya que su diámetro no es constante y homogéneo a lo largo de su longitud y su forma transversal puede no ser circular. Por lo tanto, se estima midiendo la masa de un hilo con una longitud conocida o midiendo la longitud de un hilo con una masa determinada (Hari, 2019). Se catalogan estos dos métodos fundamentales para expresar la densidad lineal de cualquier hebra textil se conocen como:

- Sistema directo (masa/longitud)
- Sistema indirecto (longitud/masa)

2.2.1.2 Diámetro del hilo

A veces es necesario conocer el diámetro aproximado del hilo, aunque es bien conocido que el diámetro del hilo no puede calcularse con exactitud debido a la naturaleza altamente comprimible del material. Sin embargo, el diámetro proporciona una idea del grado de cobertura alcanzable o de la soltura del hilo en el tejido (Hari, 2019).

Para un caso general, el diámetro del hilo en relación con la densidad lineal entera se calcula de la siguiente manera:

$$d = \frac{1}{280.2} \sqrt{\frac{T}{\varphi \rho_f}} \quad (1)$$

Donde d es el diámetro del hilo (cm), T la densidad lineal del hilo (tex), ρ_f la densidad de la fibra (g/cm^3) y φ el coeficiente de empaquetamiento del hilo.

2.2.1.3 Empaquetado del hilo

La organización o el empaquetado de las fibras en un hilo es un parámetro estructural importante que influye en la porosidad y en el volumen (volumen específico) del hilo. La porosidad tiene un impacto en el flujo del líquido debido a la acción capilar, mientras que el volumen del hilo incide en su grosor. El empaquetado se basa en las propiedades físicas/mecánicas de las fibras, de su disposición en la estructura del hilo y del nivel de torsión. El grado de empaquetamiento de las fibras en la sección transversal de un hilo se expresa mediante un índice de empaquetamiento (Hari, 2019). En la Tabla 2 se muestran algunos valores típicos para diferentes tipos de hilo.

Tabla 2. Valores del coeficiente de empaquetamiento para varios hilos (Hari, 2019).

Tipo de hilo	Coeficiente de empaquetado
Monofilamento	1.00
Cinta	1.00
Multifilamento	
Sin retorcer	0.25
Retorcido regular	0.60
Retorcido duro	0.90
Hilo de grapa	
Retorcido suave	0.33
Retorcido duro	0.60
Anillo	0.50-0.60
Rotor	0.35-0.55
Chorro de aire	0.50-0.70
Fricción	0.30-0.55
Envoltura	0.40-0.70

El coeficiente de empaquetamiento se define como:

$$\text{Coeficiente de empaquetamiento} = \frac{\text{Volumen específico de la fibra}}{\text{Volumen específico del hilo}}$$

O como:

(2)

$$\text{Coeficiente de empaquetamiento} = \frac{\text{Densidad del hilo}}{\text{Densidad de la fibra}}$$

Para los hilos mezclados, la densidad media de las fibras viene dada por lo siguiente:

$$\frac{1}{\bar{\rho}} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{\rho_{fi}} \quad (3)$$

Donde $\bar{\rho}$ es la densidad media de las fibras, p_i la fracción másica del componente i th, ρ_{fi} la densidad de las fibras del componente i th y n el número de componentes de la mezcla.

2.2.1.4 Torsión del hilo

La torsión se cuantifica por el número de vueltas presentes en una unidad de longitud del hilo. Por lo tanto, 20 tpi equivale a 20 vueltas por pulgada de hilo. La longitud puede ser expresada en pulgadas, centímetros o metros. El objetivo principal de la torsión es inducir la integridad estructural o la coherencia en un hilo de fibras discontinuas, de tal manera que el hilo sea lo suficientemente fuerte como para resistir diversos tipos de tensión. En el caso de los hilos multifilamento, la torsión se aplica principalmente con el objetivo de unir los filamentos, lo que simplifica el proceso de modo que se facilite el procesado al evitar la tendencia al deshilachado de los filamentos. Además de la resistencia y la procesabilidad, la torsión también influye en muchas otras propiedades del hilo (Hari, 2019). Por lo tanto, según sea el uso final, se selecciona un nivel de torsión óptimo. Los dos aspectos más importantes de la torsión son su orientación y su nivel (es decir, su intensidad).

Generalmente, los hilos se clasifican según su estructura o la forma en que se fabrican: de una sola capa e hilos de varias capas, según el grado de torsión (Liu *et al.*, 2009), como se muestra en la Figura 1.

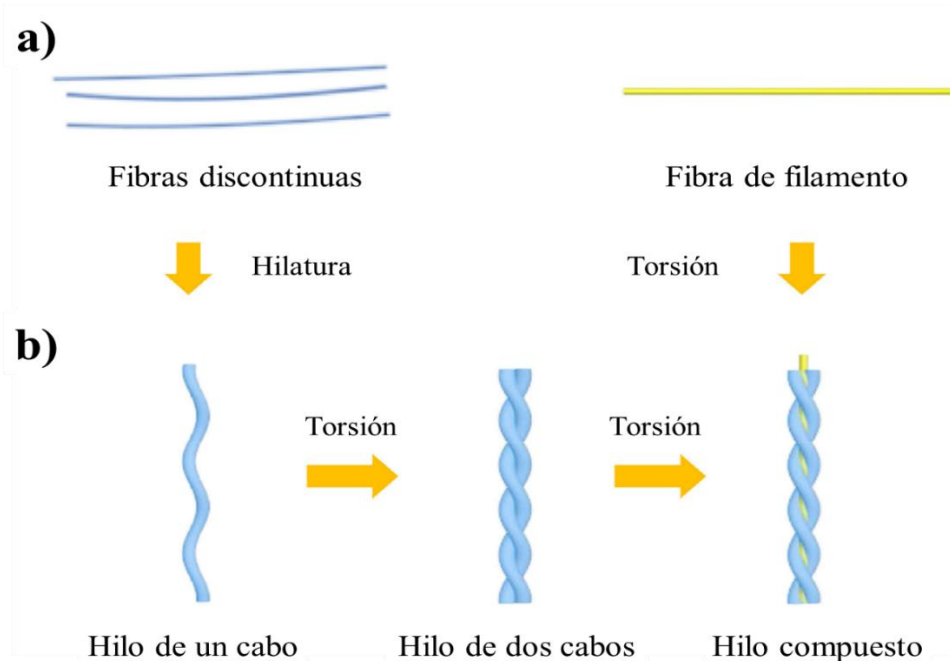


Figura 1. Esquema de los tipos de hilos según su grado de torsión a) de una capa y b) varias capas (Wen et al., 2021).

Los hilos de una sola capa se forman al torcer directamente un grupo de fibras discontinuas (cortas), tal como el algodón. La torsión es fundamental para mantener las fibras unidas y otorgarle resistencia. También puede referirse a un monofilamento que se refiere a una sola fibra continua sin torcer, frecuente en fibras sintéticas como el nylon. Su formación consiste en hilar las fibras y aplicar torsión en una sola dirección (S o Z) (Wen et al., 2021). Es decir, si la inclinación de las fibras superficiales coincide con la parte central de la letra S, se denomina torsión “S”; lo contrario ocurre con la torsión “Z”.

Los hilos de una sola capa tienden a ser más suaves y menos densos, su resistencia estará directamente relacionada con la torsión y la calidad de las fibras individuales y pueden ser más propensos a la pilling (formación de bolitas) o a la abrasión si la torsión es reducida. Este tipo de hilos se emplean en tejidos ligeros, ropa de cama, camisetas, o en aquellos lugares que requieran una textura suave.

Por otro lado, los hilos de múltiples capas (hilos de torción / doblamiento / cableado) se forman a partir de la unión de dos o más hilos, a los cuales se les aplica una torsión adicional. El hilo retorcido se produce al retorcer dos o más hilos simples en una dirección opuesta a la de la torsión original de los hilos simples. Este torcido secundario contribuye a equilibrar y a incrementar la resistencia. Además, poseen una uniformidad superior, mayor volumen y una tendencia reducida a la formación de pelusa. Estos tipos de hilos son implementados en materiales como la mezclilla, tapicería, hilos de coser de gran resistencia y ropa de trabajo.

Y el hilo cableado se produce al torcer dos o más hilos entre sí, generando un hilo muy robusto y denso. De acuerdo con sus propiedades de alta resistencia son utilizados en cuerdas, cordeles, hilos industriales de gran peso y tejidos altamente robustos. Los hilos torcidos generalmente se identifican por un número, como 30/4, que denota que se han torcido cuatro grupos de 30 hilos simples para crear una estructura torción única. El volumen específico de un hilo depende principalmente de la torsión, aunque también tienen impacto la finura, la ondulación, la rigidez a la flexión y la longitud de las fibras cortadas. En la Tabla 3 muestra algunos valores típicos del volumen específico de distintos tipos de hilo.

Tabla 3. *Volumen específico de los distintos tipos de hilo (Hari, 2019).*

Hilo	Volumen específico (cm³/g)
Hilado	
Algodón	1.10
Nilón	1.45
Poliéster	1.30
Filamento	
Nilón	1.35
Poliéster	1.16

2.2.2 Tipos de hilo para hilar

Existen dos tipos principales de hilo: los hilos de filamento y los hilados. Los hilos de filamento de título medio a fino se emplean en la confección de prendas de vestir. Los hilos de filamentos muy finos resultan más adecuados para la confección de calcetería, así como para alfombras, ropa deportiva e hilos industriales para textiles técnicos (Hari, 2019). Los hilados son adecuados para camisas, pantalones, trajes, textiles para el hogar y ropa de cama.

2.2.2.1 Hilos de filamento

A excepción de la seda natural, los hilos de filamento continuo son artificiales. Se pueden obtener a partir de polímeros naturales, tales como el papel, la viscosa, el rayón, entre otros, o de polímeros sintéticos, tales como el poliéster, el polipropileno, el polietileno, la poliamida, entre otros. Un hilo de filamento puede ser monofilamento (un solo filamento) o multifilamento (varios filamentos). Adicionalmente, existen hilos planos. Los hilos monofilamentos pueden presentarse en estado sólido o hueco. Los hilos monofilamentos poseen un único filamento que presenta una sección transversal que puede cambiar en función del uso final. Usualmente es de forma circular, aunque puede adoptar otras formas (como triangular, multilobular, dentada u ovalada). Una sección transversal no circular evita el apelmazamiento y favorece la mecha. Los monofilamentos generalmente tienen diámetros de 0, 1-2 mm. El filamento se corta a una longitud adecuada para generar fibras discontinuas, que se hilan solas o mezcladas con fibras naturales.

Invariablemente los filamentos continuos se emplean como multifilamento y se denominan hilados multifilamento. Un hilo multifilamento se compone de un conjunto de monofilamentos con una torsión nominal para dar coherencia a la estructura (Hari, 2019). También es posible que las fibras de los multifilamentos se mantengan unidas, entremezclándose o enredándose entre sí. Una sección transversal que no sea circular impide la compactación de los hilos multifilamento empaquetados.

2.2.2.2 Hilados

Se conoce como hilados a los hilos fabricados con fibras cortas (fibras naturales como algodón, lana, yute, coco, entre otras.), fibras discontinuas (rayón, poliéster / nilón / acrílico / polipropileno) o una combinación de diferentes fibras. Los hilados de fibras cortas representan un conjunto lineal de fibras cortas discontinuas. Un grupo de fibras de esta naturaleza no puede resistir ninguna carga a menos que se proporcione coherencia generando fuerzas transversales. Esto se logra a través de una torsión o una envoltura de filamentos y fibras. Los hilos retorcidos son peludos debido a la proyección de los extremos de las fibras, sin embargo, la superficie del hilo suele mostrar fibras en configuración helicoidal. La torsión en un hilo hilado se consigue mediante la hilatura de anillos convencional, o mediante métodos menos convencionales como la hilatura de rotor, la hilatura por fricción, la hilatura por chorro de aire y la hilatura de huso hueco envolvente (Ortega *et al.*, 2024). Estos hilos tienen estructuras y propiedades diferentes.

Un hilo fabricado con una mezcla de dos o más fibras diferentes se denomina hilo mezclado. La relación entre los distintos componentes en el hilo depende de las propiedades físicas y mecánicas deseadas. Las combinaciones más habituales son poliéster con algodón, poliéster con viscosa y algodón con viscosa, usualmente en proporciones de 67:33 o 50:50. Un hilado clasificado como PC (67,33) es un hilado mezclado con un 67% de poliéster y un 33% de fibra de algodón.

Un hilado puede ser simple o pueden retorcerse dos o más de estos hilos para conseguir ciertos efectos deseables, es decir, para crear un hilo trenzado o plegado. Estos efectos pueden consistir en aumentar la resistencia o reducir la vellosidad, o en crear efectos de color retorciendo hilos sencillos de diferentes colores. Los hilos plegados son un conjunto de varios hilos individuales enrollados helicoidalmente entre sí para formar una estructura coherente. Varios hilos trenzados se retuercen (generalmente en sentido contrario a la torsión del hilo trenzado) para formar un hilo de cable.

2.2.3 Pretratamiento a hilos de algodón

Hay dos áreas principales de pretratamiento. La primera es la producción en crudo, que conlleva el tratamiento del hilo para que sea adecuado para tejer, mientras que la segunda es la elaboración en húmedo, que incrementa la resistencia del hilo. Listo para teñir y estampar. Durante la elaboración del hilo, se utilizan agentes de encolado. En el proceso de preparación húmeda, se realiza una serie de pasos, tales como desencolado, descrudado y blanqueo, con el fin de preparar los hilos crudos para su teñido (Ltly, 2024).

2.2.3.1 Desencolado

Se describe como desencolado al proceso de limpieza total de la fibra de los compuestos empleados en el engomado (con el objetivo de reducir la fricción en las mallas de los telares y facilitar el proceso de tejido), los hilos suelen ser recubiertos o encolados con una mezcla compuesta principalmente por almidón modificado, grasas, ceras y otras sustancias que actúan como lubricantes y suavizantes. Este engomado necesita ser removido en una operación posterior independiente, si se desea alcanzar buenos efectos de homogeneidad en las operaciones de limpieza y blanqueo.

2.2.3.2 Descrudado

El objetivo del descruce o descrudado es eliminar por saponificación o emulsificación las materias grasas que contienen los hilos de algodón conocidos como ceras de algodón, eliminar las materias pécticas, eliminar los colores naturales del algodón y eliminar cualquier tipo de impurezas, como las cáscaras, pelusas de las semillas del algodón, entre otros.

La mayor parte de las grasas y ceras se saponifican únicamente con una disolución alcalina de hidróxido de sodio o carbonato de potasio. Las grasas y ceras que no se pueden saponificar se convierten en emulsiones y se extraen en forma de

emulsiones. El proceso de descruce puede realizarse tanto bajo presión como sin ella. El algodón se descruce bajo todas las variantes comerciales, ya sea en rama, en cintas de carda, en madeja, en bobina cruzada o principalmente en tejidos. Iniciamos explicando el proceso de descruce de los tejidos de algodón, que implica el tratamiento de los tejidos en baño alcalino con un detergente humectante que resista el medio alcalino. Estos pueden clasificarse en dos categorías:

- Aniónico: Adecuado tanto para el medio alcalino como a las temperaturas elevadas.
- No iónico: Mucho menos resistente a temperaturas elevadas y alcalinidad.

2.2.3.3 Blanqueo

Hay una variedad de colores naturales, como el amarilleo, presentes en las fibras, en particular en las fibras de algodón. Para eliminar este color natural y la polución de las plantas, se lleva a cabo un procedimiento conocido como blanqueo durante el procesamiento húmedo. El propósito principal de este procedimiento es asegurar la incorporación de agua, tintes y otros recursos textiles auxiliares en el tejido, los cuales se emplearán en etapas posteriores como el teñido y el acabado. Normalmente, las impurezas que se aplican en el tejido son hidrófobas, lo que impide que el agua las absorba. Por consiguiente, el blanqueo transforma el tejido hidrófobo en tejido hidrófilo y otorga un nivel homogéneo de blancura (Ltly, 2024).

En la industria textil se utilizan dos tipos de agentes blanqueadores: oxidativos y reductores. El blanqueo oxidativo se realiza habitualmente con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y sosa cáustica (NaOH).

2.2.4 Uso de los hilos de algodón en la industria textil

El hilo de algodón es una de las fibras más importantes y utilizadas en la industria textil a nivel mundial, debido a una combinación de propiedades únicas que lo hacen ideal para una gran variedad de aplicaciones.

Las características intrínsecas del algodón como la suavidad y confort lo hacen perfecto para prendas en contacto directo con la piel, especialmente ropa interior, ropa de bebé y prendas para pieles sensibles (Yu, 2014). La transpirabilidad y la alta capacidad de absorción logran que el aire circule libremente, ayudando a disipar el calor corporal y la humedad (sin sentirse mojado), esta propiedad es crucial para toallas, ropa deportiva y cualquier tejido que necesite absorber líquidos eficazmente.

Además, al ser hilos hechos fibras naturales pueden ser considerados hipoalergénicos al ser causar rara vez alergias o irritaciones en la piel, lo que los convierte en una opción segura para personas con sensibilidades (Sirgo, 2024). Sin dejar de mencionar la durabilidad y resistencia con la que cuentan los hilos, obteniendo así prendas duraderas que puedan soportar lavados frecuentes a máquina.

Por último, el algodón tiene una excelente afinidad por los tintes, lo que permite una amplia gama de colores y estampados, ofreciendo una gran versatilidad en el diseño. Gracias a sus propiedades, el hilo de algodón se emplea en una infinidad de productos textiles como:

- Ropa de vestir: es la materia prima principal para camisetas, pantalones, camisas, blusas, ropa interior, calcetines y ropa deportiva. Su comodidad y transpirabilidad lo hacen ideal para el uso diario.
- Textiles del hogar: ampliamente utilizado en sábanas, toallas, cortinas y tapicería. Su capacidad de absorción y suavidad en estos productos.
- Ropa de trabajo y Uniformes: su durabilidad y facilidad de mantenimiento lo hacen adecuado para prendas que requieren resistencia al desgaste.
- Productos médicos y de higiene: por su suavidad, absorción e hipoalergenicidad, se usa en gasas, vendajes, hisopos y otros productos sanitarios.
- Accesorios: bolsos, gorras, cinturones y otros accesorios también se confeccionan con hilos de algodón.
- Tejidos técnicos e industriales.

2.3 Nanopartículas de Plata (NPs de Ag)

2.3.1. Propiedades y características relevantes

Las nanopartículas son materiales pequeños con un tamaño de entre 1 y 100 nm. Poseen propiedades físicas y químicas únicas, debido a su pequeño tamaño y alta relación área superficial-volumen. Estas propiedades incluyen alta conductividad eléctrica, térmica, actividad antibacteriana y características ópticas, que dependen principalmente de su forma, tamaño, química de la superficie, composición, recubrimiento y aglomeración (Zhang et al., 2016). Por lo que su aplicación se ha extendido a diversos campos gracias a sus características únicas (Eker *et al.*, 2024).

Las nanopartículas de plata (NPs de Ag) poseen extraordinarias capacidades de absorción y dispersión gracias a su color, que varía dependiendo del tamaño y la forma de las nanopartículas. Estas características únicas de las nanopartículas de Ag causan oscilaciones de electrones conductores en la superficie del metal, denominadas resonancia plasmónica superficial (SPR en inglés), que se inician con la luz de una longitud de onda determinada. Las nanopartículas de Ag esféricas tienen la capacidad distintiva de modificar la longitud de onda máxima de SPR de 400 nm (violeta) a 530 nm (verde) cambiando el tamaño de la partícula y el índice de refracción localizado adyacente a la superficie de la partícula (El-Nour *et al.*, 2010; Abbasi *et al.*, 2014).

2.2.3.1 Tamaño

El tamaño es uno de los factores más importantes que definen las propiedades físicas, químicas y biológicas de las nanopartículas de plata. Afecta significativamente su relación superficie-volumen, propiedades ópticas y conductividad, además de generar oportunidades en diversas áreas. Su pequeño tamaño potencia la interacción y la reactividad con las moléculas circundantes, ya sea en solución o sobre superficies. Tomando en cuenta esto, resulta evidente que el tamaño de las nanopartículas influye

en gran medida sus tributos físicos, efectos biológicos y toxicidad. Así pues, es necesario considerar meticulosamente el tamaño durante el proceso de síntesis.

2.2.3.2 Forma

Las nanopartículas de plata tienen múltiples formas de síntesis, entre ellas esféricas y en forma de barras. Triangulares, cubicas, similares a alambres y en forma de estrella (Zhang J. *et al.*, 2022). Muchas propiedades, como las ópticas, catalíticas y eléctricas, se ven influenciadas por la forma de las nanopartículas de plata. Por ejemplo, la forma y el tamaño de las nanopartículas de plata potencian de manera significativa sus interacciones con los sistemas biológicos. Adicionalmente, se ha observado que la actividad antimicrobiana se ve afectada por la velocidad de los iones de plata se liberan de las nanopartículas de plata. De esta manera, las nanopartículas esféricas son extremadamente favorecidas dado que son capaces de liberar iones de plata de forma más eficaz, gracias a su mayor relación área superficial-volumen en comparación con otras formas, como placas y discos triangulares.

2.2.3.3 Carga superficial

Una de las características clave de las nanopartículas es su carga superficial, que afecta de manera significativa en su estabilidad e interacciones con otras moléculas. Su manejo posibilita un control preciso del comportamiento de las nanopartículas en diferentes entornos, lo cual influye en su agregación, solubilidad y reactividad. Por ejemplo, la modificación de las cargas superficiales influye en las actividades biológicas de las nanopartículas de plata (Bamal *et al.*, 2021), tal como lo estudiaron Abbas *et al.*, en su investigación en la que estudiaron como las diferentes cargas superficiales en las nanopartículas de plata afectan su capacidad para combatir bacterias, como *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) y *Escherichia coli* (*E. coli.*). Los descubrimientos señalaron que las nanopartículas de plata con carga positiva resultaron ser más bactericidas, generando zonas de inhibición más grandes y

necesitando concentraciones más bajas para ser eficaces frente a sus contrapartes neutras y con carga negativa (Abbaszadegan *et al.*, 2015).

2.3.2. Métodos de síntesis de NPs de Ag

Es crucial entender los métodos de síntesis de nanomateriales de plata es importante debido a su extensa gama de uso y aplicaciones. El mayor desafío en la síntesis de nanopartículas de plata radica en el control de sus propiedades físicas, tales como conseguir una distribución homogénea del tamaño de partícula, forma, morfología, recubrimiento o agente estabilizador, composición química y estructura cristalina idénticas (Güzel & Erdal, 2018). Los métodos de síntesis descendente y ascendente (ver Figura 2) son dos técnicas de síntesis de nanopartículas metálicas que involucran medios químicos, físicos y biológicos. La producción habitual de las nanopartículas implica procesos físicos y químicos.

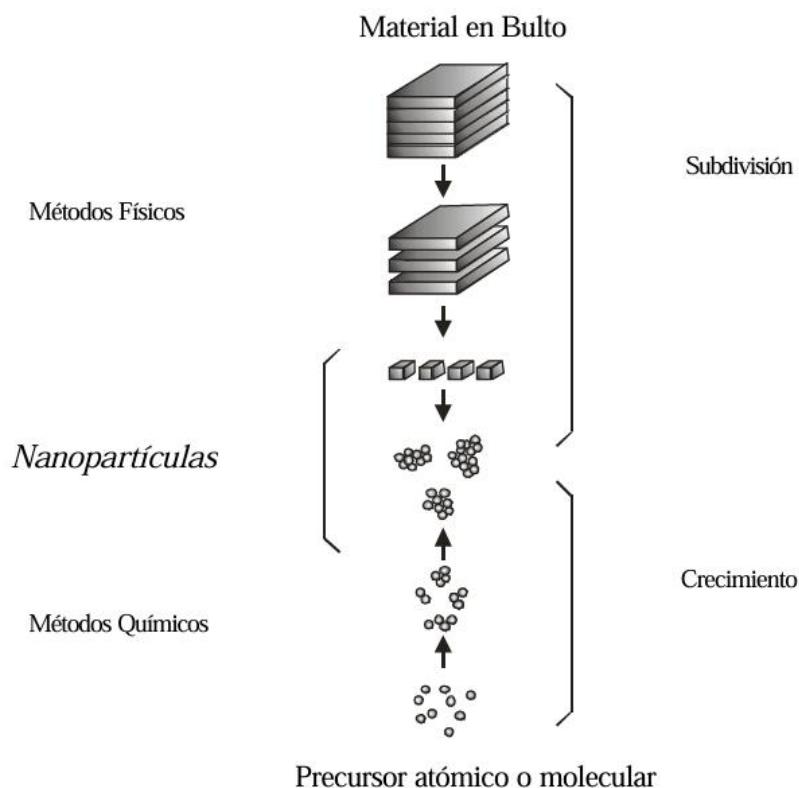


Figura 2. Ilustración esquemática de los métodos de preparación de partículas (Sánchez Ramírez, 2004).

2.3.2.1 Métodos físicos

Los métodos físicos más importantes para la síntesis de nanopartículas de plata son la evaporación-condensación, la ablación láser, la irradiación eléctrica, la irradiación gamma y la litografía. Kimura and Bandow (1983), analizaron los espectros ópticos de numerosas soluciones de coloides metálicos y propusieron nuevos métodos para la preparación de coloides metálicos en solventes inorgánicos sin productos químicos como reactivos redox, polímeros, electrolitos, pegamento u otros tipos de estabilizadores coloidales. Se utilizaron tres métodos de preparación diferentes, como el método de aislamiento de matriz, el método de trampa de flujo de gas frío y el método de trampa de flujo de gas-solución, para examinar la síntesis de nanopartículas de plata (Kimura & Bandow, 1983).

2.3.2.2 Métodos químicos

Entre los métodos existentes, los métodos químicos han sido los más comunes para la producción de nanopartículas de plata. La reducción química de iones metálicos es la ruta más universal y sencilla para la preparación de nanopartículas metálicas. La transformación química de los iones de plata en nanoestructuras de plata puede ocurrir mediante métodos fotoquímicos (Jin *et al.*, 2003), síntesis química húmeda con (Hao *et al.*, 2002) o sin plantillas, empleando cristal líquido (Wang *et al.*, 2005) y plantillas poliméricas (Kim *et al.*, 2004). Generalmente, el proceso de síntesis química de las NPs de Ag en solución usualmente emplea los siguientes tres componentes principales: (i) precursores metálicos, (ii) agentes reductores, y (iii) agentes estabilizadores/de recubrimiento (Chouhan, 2018).

En general, se utilizan diferentes agentes reductores, como el citrato de sodio, el ascorbato, el borohidruro de sodio (NaBH_4), el hidrógeno elemental, el proceso de poliol, el reactivo de Tollens, la N, N-dimetilformamida (DMF), los copolímeros de bloque de polietilenglicol, la hidrazina y el formiato de amonio, para la reducción de los iones de plata (Ag^+) en soluciones acuosas o no acuosas (Güzel & Erdal, 2018).

2.3.3 Actividad antibacteriana de las NPs de Ag

La acción antimicrobiana con respecto a las NPs de Ag no se comprende totalmente; por otro lado, hay algunas suposiciones que explican la actividad antimicrobiana. Las NPs de Ag tienen la capacidad de penetrar la célula o adherirse a la pared celular debido a su gran área superficial, lo que resulta en la interrupción de la permeabilidad de la membrana, volviéndose porosa y, en última instancia, conduce a una mayor fuga de contenido celular (Kambale *et al.*, 2020). Por lo que, la formación de poros sobre la membrana resulta en la difusión de las nanopartículas en la célula y se unen a las proteínas que encierran fósforo y azufre, resultando en la desactivación del ADN y las proteínas (Vijayan *et al.*, 2017). La hipótesis alternativa propone que la

liberación de plata (Ag⁺) a través del procedimiento de disolución de oxidación es la razón de la actividad antimicrobiana de las NPs de Ag.

Las NPs de Ag se han convertido en un excelente agente antimicrobiano capaz de combatir bacterias positivas y negativas, incluyendo cepas multirresistentes, que causan contagios tanto *in vitro* como *in vivo*.

Los principales mecanismos de acción antimicrobiana de las NPs de Ag implican la liberación de especies altamente reactivas de oxígeno (ROS) que interactúan con las membranas microbianas alterando la función celular generando su muerte. Estos ROS hacen que las NPs de Ag sean eficientes contra varios patógenos, incluidos los que son resistentes a los antibióticos y a múltiples fármacos (Wang *et al.*, 2017). De manera similar, esta propiedad de las NPs de Ag también se enfatiza en varios tipos de aplicaciones en diferentes industrias como la alimentaria, la médica y particularmente la textil (Panáček *et al.*, 2009).

2.3.4 Mecanismos de acción antibacterial de las NPs de Ag

Las NPs de Ag presentan mecanismos de acción simultáneos y múltiples en combinación con otros agentes antibacterianos, como antibióticos o compuestos orgánicos, contra bacterias patógenas (Cavassin *et al.*, 2015). Sin embargo, el mecanismo específico por el cual las NPs de Ag inhiben el crecimiento o la actividad bactericida aún no se ha esclarecido por completo. Los resultados de la investigación actual respaldan varios mecanismos contra diferentes tipos de bacterias (Tabla 4), que tienen en cuenta sus características químicas y físicas, por ejemplo, las dimensiones y el exterior que permite su interacción o paso a través de las membranas y paredes celulares con alteración de los componentes intracelulares (Qing *et al.*, 2018).

Tabla 4. Mecanismo antimicrobiano de las NPs de Ag contra varios tipos de bacterias (Qing et al., 2018).

Tipo de bacteria	Mecanismo
<i>Staphylococcus aureus</i>	Daño de la membrana celular de los microbios y aumento de la concentración de ROS
<i>Escherichia coli</i>	Destrucción del ADN celular mediante la inducción del sistema de reparación por escisión de bases Contacto con ROS y unión de NPs de Ag en la pared celular de microbios
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Contacto con ROS y unión de NPs de Ag en la pared celular de microbios
<i>Bacillus Calmette-Guérin</i>	Acumulación de NPs de Ag en la pared celular además de la membrana celular de la célula bacteriana
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	El estrés oxidativo provoca cambios en la proteína quinurenina. La activación de la vía de la quinurenina inhibe el crecimiento bacteriano.
<i>Proteus sp.</i>	Rotura de la pared celular e inhibición de la replicación del ADN que inhibe el crecimiento bacteriano

Actualmente, la literatura propone principalmente cuatro mecanismos que se observan por separado o en conjunto, a través de los cuales las NPs de Ag ejecutan su actividad antimicrobiana.

2.3.4.1 Adhesión a la membrana microbiana

Las NPs de Ag tienen la capacidad de adherirse o pegarse a la pared o la membrana celular, lo que provoca desestabilización y daño celular, mejorando la permeabilidad de la membrana, además de provocar la fuga de constituyentes celulares y, sucesivamente, la muerte celular (Seong & Lee, 2017). Esta adherencia se debe a la atracción electrostática de iones de plata positivos que se generan a través de la oxidación de las NPs de Ag y la membrana celular cargada negativamente (Choi et al.,

2010). Se ha demostrado que las NPs de Ag también podrían interactuar con proteínas que contienen azufre dentro de la pared celular bacteriana. Esta interacción resultó en una destrucción estructural que resultó en la ruptura de la pared celular (Swolana & Wojtyczka, 2022). La adhesión de las NPs de Ag conduce a variaciones morfológicas irreparables en la membrana celular, además de la pérdida de la integridad de la bicapa lipídica. Los cambios en la estructura celular debido a la adhesión de las NPs de Ag aumentan la permeabilidad de la membrana celular, lo que a su vez influye en la capacidad de las células para regular su actividad con regularidad. El aumento de la permeabilidad también provocó la fuga de componentes celulares como proteínas, citoplasma, iones, ATP y reserva de energía celular que podrían persuadir el impacto de las células fantasma con respecto a los microorganismos. Este impacto dentro de las bacterias se produce al eliminar el contenido microbiano o celular, lo que crea una envoltura hueca de microorganismos (Wakshlak *et al.*, 2015).

2.3.4.2 Penetración en la célula y alteración de la actividad celular

Las NPs de Ag tienen la capacidad de alterar las biomoléculas intercelulares y penetrar en las células, afectando así su actividad. Pueden ingresar a las células bacterianas a través de canales llenos de agua conocidos como porinas y unirse a las estructuras y biomoléculas (ADN, proteínas y lípidos) de las células, destruyendo así la estructura interna de las bacterias. Los iones de Ag liberados al entorno se unen a proteínas negativas que modifican su configuración, lo que provoca su desactivación (Webster & Seil, 2012). Además, las NPs de Ag también interactúan con el ADN bacteriano, provocando su desnaturalización e interrumpiendo el crecimiento microbiano. Las NPs de Ag reducen la estabilidad del ADN en relación con la repelencia electrostática entre el ADN y las NPs de Ag (Sadoon *et al.*, 2020).

2.3.3.3 Generación de especies reactivas de oxígeno (ROS)

Este mecanismo normalmente causa estrés oxidativo dentro de las células microbianas. Estos complejos oxigenados se entrelazan en diferentes eventos celulares biológicos, como el superóxido de hidrógeno, el peróxido y los radicales hidroxilos (Muneeswaran *et al.*, 2023). Las nanopartículas de plata producen radicales libres y ROS que, en última instancia, aumentan el estrés oxidativo dentro de las células, lo que contribuye a la actividad antimicrobiana. La generación intercelular de ROS es un indicador clave de la toxicidad de las nanopartículas, que inducen daño lipídico, fuga de biomoléculas celulares y, finalmente, la muerte celular (Quinteros *et al.*, 2016).

2.3.4.4 Modulación del sistema de señalización celular

El mecanismo de señalización de relevo es esencial para el crecimiento y la actividad celular y se ha caracterizado en microbios mediante la cascada de desfosforilación y el ciclo de fosforilación (Mikhailova, 2020). Las NPs de Ag controlan la vía de señalización que depende de la cascada de desfosforilación y fosforilación de enzimas o proteínas. Las NPs de Ag actúan como moduladores de la transducción de señales en las células microbianas debido a sus extraordinarias características fisicoquímicas, inhibiendo así el crecimiento microbiano (Salleh *et al.*, 2020).

2.5 *Staphylococcus aureus*

Staphylococcus aureus es un relevante patógeno bacteriano humano que provoca una diversidad de infecciones clínicas (Lowy, 1998). Las infecciones son comunes en ambientes comunitarios y hospitalarios, por lo que el manejo del tratamiento continúa siendo difícil debido a la aparición de cepas como SARM (*Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina) resistentes a múltiples fármacos (Boucher & Corey, 2008). *S. aureus* se encuentra en el medio ambiente y también en la flora humana normal, localizada en la piel y las membranas mucosas (con mayor

frecuencia en el área nasal) de la mayoría de las personas sanas (Lowy, 1998), no suele causar infección en la piel sana; sin embargo, si se permite que entre en el torrente sanguíneo o los tejidos internos, esta bacteria puede causar diversas infecciones potencialmente graves. La transmisión usualmente ocurre mediante contacto directo. No obstante, ciertas infecciones se producen a través de otros métodos de transmisión (Rasigade & Vandenesch, 2013).

2.6 Métodos de evaluación de la actividad antibacterial.

Se pueden utilizar diversos métodos de laboratorio para evaluar o analizar la actividad antimicrobiana in vitro de las NPs de Ag. Los métodos conocidos y básicos son la difusión en disco y la dilución en caldo o agar.

2.6.1 Método de difusión en agar

Los ensayos basados en difusión en agar, incluyendo la difusión en disco, difusión en pocillos, tapón de agar y ensayos de mancha de agar, son técnicas ampliamente utilizadas y rentables en la investigación antimicrobiana para determinar la actividad antimicrobiana de los compuestos de prueba. Estos métodos se basan en la difusión de agentes antimicrobianos desde discos de papel, pocillos o tapones hacia el medio de agar adyacente, inhibiendo el crecimiento del microorganismo de prueba inoculado en la superficie del agar (Bauer *et al.*, 1966). Al medir la zona de inhibición resultante (Figura 3), que representa el área donde el agente previene o inhibe el crecimiento microbiano, los investigadores pueden evaluar la potencia relativa del compuesto de prueba contra el microorganismo específico bajo investigación (Tarannum *et al.*, 2023). El ensayo de difusión en agar sirve como una herramienta valiosa en la investigación antimicrobiana, proporcionando datos cualitativos sobre la efectividad de diferentes sustancias contra microorganismos específicos.

En este procedimiento bien conocido, se inoculan placas de agar con un inóculo estandarizado del microorganismo de prueba. A continuación, se colocan sobre la superficie del agar discos de papel de filtro (de unos 6 mm de diámetro) que contienen

el compuesto de prueba a la concentración deseada. Las placas de Petri se incuban en condiciones adecuadas. Generalmente, el agente antimicrobiano se difunde en el agar e inhibe la germinación y el crecimiento del microorganismo de prueba; posteriormente, se miden los diámetros de las zonas de inhibición del crecimiento.

El ensayo de difusión en disco ofrece numerosas ventajas sobre otros métodos: simplicidad, bajo coste, la posibilidad de analizar una gran cantidad de microorganismos y agentes antimicrobianos, y la facilidad de interpretación de los resultados.



Figura 3. Representación esquemática de los protocolos de ensayo de difusión en disco para la determinación de la actividad antimicrobiana (Hossain, 2024).

2.7 Uso de nanopartículas de plata en hilos para aplicación textil

Los textiles funcionales son extremadamente importantes en los campos de la ciencia de los materiales y la industria textiles (Kiekens *et al.*, 2014). Los textiles funcionales o técnicos se definen como textiles que tienen una función específica como

antibacteriano (Ye *et al.*, 2005; Gao & Cranston, 2008), antiestático (Varesano & Tonin, 2008; Kan, 2007), resistente a las manchas (Misra *et al.*, 2009), conductor (Wu *et al.*, 2009), protección ultravioleta (Paul *et al.*, 2009; Gowri *et al.*, 2010; Xue *et al.*, 2008), por mencionar algunos. Además de las propiedades inherentes de los textiles en su conjunto, los textiles funcionales tienen propiedades físicas y químicas adicionales. Por lo que, los textiles funcionales con características de alto valor añadido tienen una gran demanda a medida que los mercados textiles internacionales se vuelven cada vez más competitivos (Holme, 2007; Cherenack & Van Pieterse, 2012). Dependiendo de los requisitos funcionales, las telas se pueden clasificar en cuatro tipos, que son protección del cuerpo humano, 19 mejora de la comodidad, 20 regeneración ambiental, 21 y alto rendimiento (Bedeloglu *et al.*, 2012; Cheng *et al.*, 2015). Los hilos que combinan propiedades mecánicas y funcionales se conocen como hilos funcionales o nanohilos, hechos de fibras funcionales. Un nanohilo es una mezcla de múltiples fibras producidas en una composición particular. Utilizando nuevas mezclas de fibras, es posible crear hilos con propiedades absorbentes de humedad, hidrófugas, aislantes térmicos y antibacterianas, hechos de algodón, nylon, polipropileno y otras fibras sintéticas. Al combinar fibras textiles y no textiles, podemos crear materiales para diversas aplicaciones, incluyendo pieles sensibles, aplicaciones táctiles y tejidos funcionales (Saty *et al.*, 2024).

El interés en el uso de nanopartículas con propiedades antibacterianas en el sector textil ha aumentado porque algunos microorganismos causantes de infecciones en la piel como forunculosis, impétigo, celulitis o en casos más graves como neumonía, endocarditis y meningitis, han aumentado su resistencia a determinados antibióticos. Así pues, la implementación de nuevos nanohilos con características antibacteriales representa una alternativa de control para reducir o eliminar estas infecciones. (Rojas-Lema *et al.*, 2017; Perelshtein *et al.*, 2008). La nanotecnología se ha aplicado en telas de algodón incorporando nanopartículas de Ag para evitar o eliminar la formación de bacterias patógenas. Adicionalmente, las NPs de Ag se han aplicado en telas sintéticas como poliéster y nylon con el objetivo de eliminar virus y bacterias (Laga & Wasif,

2009). Además, el beneficio radica en que solo se requieren bajas cantidades, lo cual se puede corroborar con estudios (H. J. Lee & Jeong, 2005), donde indican que, con concentraciones de 10, 20 y 30 ppm de nanopartículas de plata impregnadas en tela de algodón, el número de colonias bacterianas podría reducirse en un 99.99 %.

El estudio de la adición de nanopartículas a textiles requiere una buena adhesión para que las propiedades adquiridas tengan el efecto deseado. Por lo tanto, el uso de un agente ligante es fundamental, ya que actúan como enlace entre el textil y las nanopartículas, evitando su pérdida con el tiempo debido al uso o el lavado. Entre los agentes ligantes disponibles, se encuentran los sintéticos (acrílicos, estireno-butadieno) y los naturales (almidones y derivados). Para elegir el tipo de agente ligante, se deben considerar los requisitos finales, las aplicaciones y el costo.

2.7.1 Nanohilos de algodón

Los nanohilos son hilos fabricados a partir de fibras naturales o sintéticas funcionalizadas con nanomateriales con diámetros medidos en nanómetros (1-100 nm). Estas fibras, llamadas nanofibras poseen propiedades únicas debido a su pequeño tamaño, así como por su gran superficie y porosidad, lo que los hace adecuados para diversas aplicaciones. Las fibras pueden combinarse para crear nanohilos con propiedades mejoradas, como alta resistencia, flexibilidad, conductividad, ópticas, biológicas y funcionales (Jayadevan *et al.*, 2024). Así los nanotextiles comenzaron a abrir oportunidades previamente inexploradas e inimaginables.

Gracias a la nanotecnología, ahora es posible producir hilos que no solo serán duraderos, sino también respetuosos con el medio ambiente. Al obtener nanohilos con diferentes colores, teñidos por la incorporación de diferentes tipos de nanoestructuras que además del color les proporcionara funciones como impermeabilidad, propiedades antibacterianas o protección UV.

2.8 Métodos de adsorción de NPs en hilos de algodón

Los métodos de adsorción de NPs en hilos de algodón para conferirles propiedades funcionales son variados, la clave está en lograr una adsorción efectiva y duradera de las NPs, ya que la celulosa del algodón no siempre interactúa fuertemente con la plata por sí misma. Estos métodos se dividen en dos categorías principales:

- Método *ex situ*: consiste en sintetizar las NPs por separado en una solución coloidal, y luego se aplica sobre el hilo de algodón. Logrando la adsorción a través de la inmersión del hilo en la solución de NPs (Li Z. *et al.*, 2017).
- Método *in situ*: en el que ion metálico se carga primero en el hilo de algodón y luego se lleva a cabo su reducción iniciándose su nucleación y crecimiento hasta la escala nanométrica. Es un método con mayor eficiencia, rentable y respetuoso con el medio ambiente. Además, necesita menos tiempo y consumo de agua, reduce la aglomeración de las NPs y aumenta la entrada de las NPs en la estructura del hilo (Meda *et al.*, 2023).

2.9 Técnicas de caracterización de los hilos textiles funcionalizados

El estudio de la formación, tamaño, forma, estructura y propiedades ópticas de las partículas de Ag sintetizadas *in situ* en el hilo de algodón se realizó en dos partes: primero se establecieron las mejores condiciones de crecimiento *in situ*, su evaluación se realizó mediante análisis del color producido por la absorción óptica seleccionada de ciertas longitudes de onda por las partículas metálicas en escala nanométrica. Después de optimizar las condiciones experimentales, se realizó la caracterización de las partículas obtenidas utilizando Difracción de Rayos-X (XRD), Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS) y Espectroscopía UV-Vis.

Para este trabajo, dos estrategias fueron planteadas: (a) en la primera de ellas se decidió investigar la formación, tamaño y estructura de las nanopartículas de Ag sobre el hilo de algodón, (b) La segunda estrategia consistió en la desorción de las nanopartículas de Ag en una solución polimérica conteniendo alcohol polivinílico para su caracterización de las propiedades ópticas en el rango UV-Vis.

2.9.1 Espectroscopía UV-Vis

Las propiedades más observables en las nanopartículas metálicas son las ópticas (colores) que tienen un gran valor estético, científico y tecnológico. Por ejemplo, las dispersiones coloidales de Au de Faraday aun preservan su color rojo intenso. De hecho, las nanopartículas de Au, Ag y Cu tienen colores característicos relacionados con sus tamaños de partícula (Mabuchi *et al.*, 1982). Estas propiedades son frecuentemente elucidadas a través de la espectroscopia de absorción óptica en la región UV-Vis (Lu *et al.*, 1999; Bönnemann *et al.*, 1997), la cual es una técnica donde se realiza la medición e interpretación del cambio en la radiación electromagnética absorbida o emitida por las partículas. La región espectral correspondiente al ultravioleta visible que va desde longitud de onda entre 10 y 200 nm, UV cercano entre 200 y 400 nm, y visible entre 400 y 800 nm, (Figura 4) del espectro electromagnético.

Espectro Electromagnético

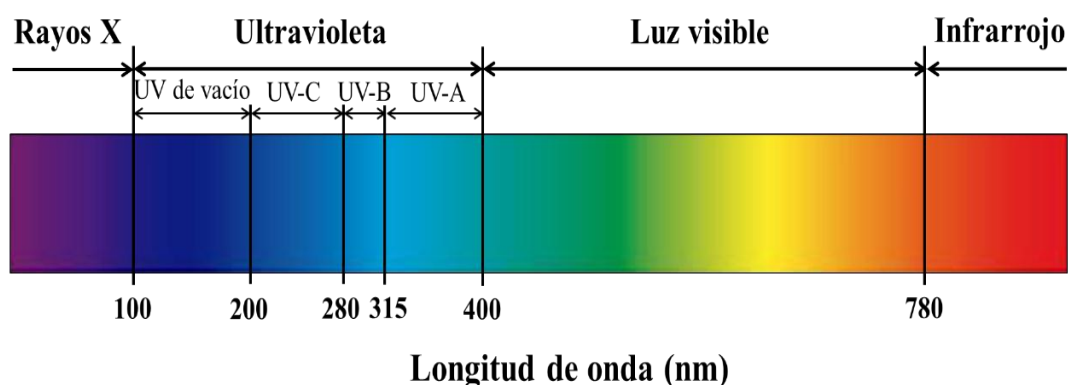


Figura 4. Espectro Electromagnético.

La espectroscopia UV-Vis brinda información sobre las transiciones electrónicas de las partículas metálicas. Las energías asociadas con las transiciones electrónicas son muy altas, mayores incluso que la energía necesaria para producir la disociación de algunas moléculas. Este tipo de espectroscopía involucra la absorción de luz por las nanopartículas metálicas (NPs) causando la resonancia del plasmón superficial a una frecuencia específica, del rango total de longitudes de onda que se proporcionan a las nanopartículas, solo se absorben aquellas que producen una excitación colectiva de electrones, y es de hecho un efecto de tamaño, porque está ausente tanto en los átomos individuales como en los materiales en bulto. La presencia de esta banda en la región visible del espectro es responsable de los atractivos colores de algunas partículas metálicas con tamaños en la escala nanométrica. Posteriormente la nanopartícula regresa a su estado inicial de energía (Aguilar Méndez, 2008; Passos *et al.*, 2018).

A un nivel fundamental, los espectros de absorción óptica proporcionan información sobre la densidad electrónica, tamaño y estructura (Link & El-Sayed, 1999). Así, para estas nanopartículas metálicas de Ag, la espectroscopia UV-Vis es una herramienta indispensable para su caracterización.

Los espectros de absorción de la dispersión coloidal de Ag fueron realizados en el laboratorio de nanoestructuras del CIBA-IPN por medio de un espectrofotómetro marca Thermo Scientific, modelo: Genesys 10S de doble haz en el intervalo de 190-1200 nm (Figura 5).



Figura 5. Espectrofotómetro de UV-Vis

2.9.1.1 Resonancia de plasmón superficial localizado

Cuando el material plasmónico (la nanoesfera es pequeña en comparación con la longitud de onda de la luz, y la luz tiene una frecuencia cercana a la del plasmón superficial, entonces el plasmón superficial absorberá energía) se expone a la luz solar, los electrones libres de la nanopartícula de metales nobles se integran con la energía

del fotón que produce subondas y electrones conductores en modo oscilante (Maier, 2007; Lal *et al.*, 2007). Estas oscilaciones colectivas (excitación) ofrecen una resonancia plasmónica de superficie localizada (LSPR). LSPR agrega los beneficios del efecto de calentamiento local mejorado, generación de e/h alimentada por LSPR (Figura 6), absorción UV-Vis mejorada, longitud de difusión e/h reducida, efecto eléctrico local mejorado y efecto de polarización molecular, efecto de túnel cuántico, alto efecto catalítico y a la unidad fotocatalítica principal. Por lo tanto, las NPs de metales nobles actúan como centros activos de reacción redox térmica en el catalizador que puede atrapar, dispersar y concentrar la luz (Wang X. *et al.*, 2005; Cao *et al.*, 2006; Virkutyte & Varma, 2010), y mejorar el número de sitios activos y la tasa de formación de huecos de electrones al proporcionar un carril rápido para la transferencia de carga en la superficie del semiconductor. Cu, Ag, Au, Pt, Pd y sus aleaciones Cu-Ag, Cu-Au, Cu-Ag-Au, son algunos ejemplos de NPs de metales nobles con SPR. Este fenómeno produce numerosos efectos físicos que incluyen absorción adaptable de luz (desde UV hasta infrarrojo cercano), calentamiento local y transferencia de carga competente. Por lo tanto, la fotoexcitación conduce a una transferencia de electrones suave entre el portador/soposte del semiconductor y las NPs de metal noble. Las NPs de Ag o Au (<10 nm) son los materiales plasmónicos más comúnmente utilizados.

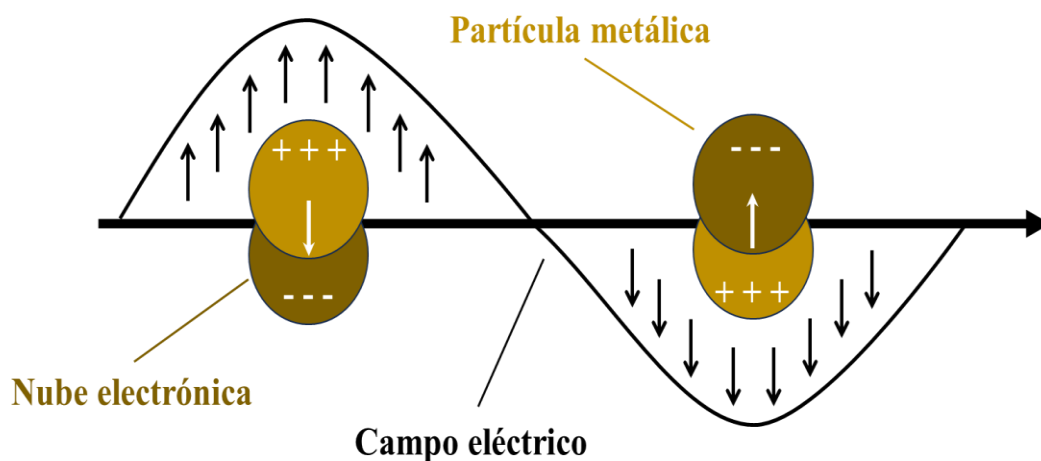


Figura 6. Resonancia plasmónica localizada en una esfera metálica (Chouhan, 2018).

2.9.2 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido (Scanning Electron Microscopy, SEM) es un tipo de microscopio electrónico con la capacidad para producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra. Debido a la manera en la que la imagen es creada, las imágenes SEM tienen una apariencia tridimensional que las caracteriza y son útiles para juzgar la estructura superficial de una muestra. Por otro lado, la resolución que puede alcanzar un microscopio óptico está limitada por la longitud de onda de la luz, en tanto el fundamento de la resolución del microscopio electrónico se apoya en las propiedades ondulatorias del electrón, haciendo uso de un haz de electrones de alta energía y longitud de onda inferior a la de la luz, lo que permite incrementar la resolución. Todos los microscopios electrónicos disponen de un cañón de electrones y una serie de lentes magnéticas que crean campos que dirigen y enfocan el haz de electrones hacia la muestra. Una parte esencial de un microscopio electrónico la constituye el sistema de vacío, pues los electrones pueden ser desviados por las moléculas de aire, requiriéndose para evitar esto un vacío casi total en el interior del microscopio. Esta técnica no solo permite analizar la morfología de un material, sino que también permite obtener datos sobre la composición química del material a través de la espectroscopia de energía dispersiva (Datye & DeLaRiva, 2023).



Figura 7. Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) marca: Vega Tescan, modelo: TS5136SB.

Las micrografías de los hilos conteniendo a las nanopartículas de Ag fueron obtenidas en el laboratorio de nanoestructuras de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por medio de un microscopio electrónico marca Vega Tescan (ver Figura 7).

2.9.3 Espectroscopía de Energía Dispersa (EDS)

La Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS por sus siglas en ingles), es una técnica analítica usada para la determinación y cuantificar de la composición elemental de una muestra. Haciendo incidir un haz de electrones sobre la muestra se logra excitar a los electrones ligados a los átomos de la muestra ya sea a un estado de electrón libre o un nivel de energía más alta no ocupada, Figura 8. Las transiciones cuánticas debido a estas excitaciones harán que muchas señales de dispersión, por ejemplo, rayos X sean emitidas, y que puedan ser detectadas y analizadas. Puesto que la energía de rayos X es una característica distintiva de cada elemento, que es utilizado para analizar la

composición de las muestras. Técnicamente, el colector de análisis EDS detecta, separa y grafica en función de la energía y automáticamente identifica y etiqueta los elementos responsables de los picos en el espectro de distribución de energía. Los datos obtenidos en EDS se comparan con estándares o patrones conocidos para producir un análisis completo de composición. La mayoría de los análisis de EDS se pueden realizar en pocos minutos, por lo consiguiente es un método rápido para determinar la composición química de los materiales (Samal *et al.*, 2022).

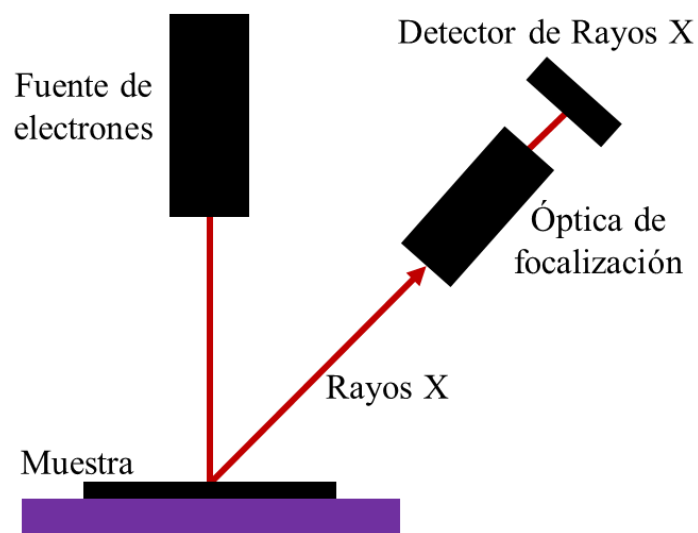


Figura 8. Esquema representativo de la Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS).

2.9.4 Difracción de rayos X

La difracción de Rayos-X es una técnica versátil y no destructiva utilizada para analizar la estructura de las nanopartículas metálicas (Toshima & Yonezawa, 1998). En esencia, los Rayos X interactúan con los átomos de un material cristalino, y la forma en que se difractan (se dispersan) revela información sobre la disposición de esos átomos y la estructura de la materia. Para nanopartículas metálicas, la evaluación del tamaño y calidad estructural de las partículas pueden ser investigados por XRD.

Sin embargo, cuando estas partículas tienen un diámetro menor a 2 nm, la adquisición de información estructural puede resultar difícil. La comparación de los difractogramas obtenidos de las nanopartículas de Ag con las correspondientes cartas cristalográficas permiten confirmar la propiedad de calidad cristalina de las nanopartículas de Ag.

Ley de Bragg

Cuando un rayo X alcanza la superficie de un cristal a cualquier ángulo θ , una porción del rayo se dispersa por la capa de átomos de la superficie. La porción no dispersada penetra en la segunda capa de átomos, donde otra vez una fracción es dispersada, y la que queda pasa a la tercera capa (Figura 9). El efecto acumulativo de esta dispersión desde los centros regularmente espaciados del cristal es la difracción del haz. Los requisitos para la difracción de rayos X son: (1) el espaciado entre capas de átomos debe ser aproximadamente del mismo orden que la longitud de onda de la radiación y (2) los centros de dispersión deben estar distribuidos en el espacio de una manera muy regular. En 1912, W. L. Bragg estudió la difracción de rayos X por cristales (Bunaciu *et al.*, 2015).

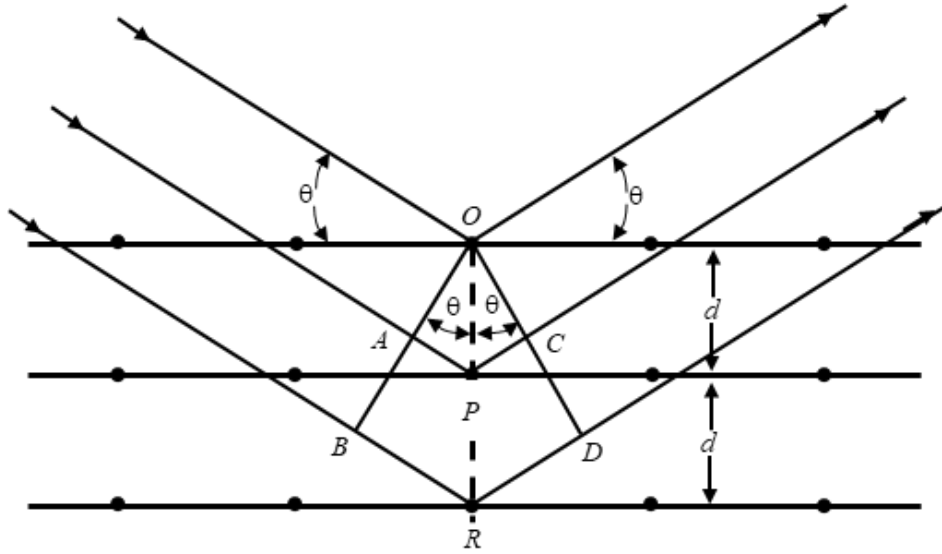


Figura 9. Difracción de rayos X por un cristal.

Un haz estrecho de radiación choca con la superficie del cristal con un ángulo de incidencia θ , la dispersión tiene lugar como consecuencia de la interacción de la radiación con los átomos localizados en O, P y R. Si la distancia

$$AP + PC = n\lambda \quad (4)$$

donde n es un entero, la radiación dispersada estará en fase, será coherente y el cristal reflejará la radiación X. De la misma figura se observa que

$$AP = PC = d \sin \theta \quad (5)$$

donde d es la distancia interplanar del cristal. Así, se puede escribir que las condiciones para una interferencia constructiva del haz con ángulo θ son

$$n\lambda = 2d\text{sen}\theta \quad (6)$$

Esta ecuación es conocida como la ecuación de Bragg. Hay que señalar que los rayos X son reflejados por los planos del cristal sólo si el ángulo de incidencia satisface la condición de interferencia constructiva:

$$\text{sen}\theta = \frac{n\lambda}{2d} \quad (7)$$

donde λ es la longitud de onda de los rayos-X. A los demás ángulos se tiene interferencia destructiva.

El ancho del pico, $\Delta(2\theta)$ (en radianes) en los difractogramas, a la mitad de su máxima intensidad puede ser utilizado como una medida del tamaño (ϕ) de los clusters. Una mayor cantidad de planos hacinados contribuye a una interferencia destructiva en planos que no cumplen la ley de Bragg dando como resultado un pico de Bragg más agudo, como lo describe la fórmula de Scherrer (Cullity & Stock, 2013):

$$\phi = \frac{0.9\lambda}{\Delta(2\theta)\cos\theta} \quad (8)$$

Así, la fórmula anterior fue utilizada para estimar en algunos casos el tamaño.

Los espectros de difracción de rayos-X de las muestras fueron obtenidos en un difractómetro Siemens D5000 usando radiación Cu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), a temperatura ambiente con un barrido de 1.0° por minuto. El estudio fue realizado en el laboratorio de difracción de Rayos X del Departamento de Física del CIVESTAV-IPN

CAPÍTULO 3



3. Metodología

3.1 Materiales y Métodos

Los materiales químicos utilizados en este trabajo de Tesis fueron los siguientes; Hidróxido de Sodio (NaOH, al 99.0%), Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂, al 99.0%), Silicato de Sodio (Na₂O₃Si), Carbonato de Sodio (Na₂CO₃), Abrillantador, Hidróxido de sodio (NaOH, al 85%), Nitrato de Plata (AgNO₃, al 99.0%), Borohidruro de Sodio (NaBH₄, al 99.0%), Etanol (C₂H₅OH), todos adquiridos de Sigma Aldrich. Jabón neutro (Extran MA O₂, Merck) fue utilizado para lavar de todo el material de laboratorio.

3.2 Pretratamiento al hilo de algodón

3.2.1 Descruce y blanqueo

Hilos crudos de algodón 100% fueron utilizados durante este trabajo de investigación. El hilo adquirido comercialmente fue primeramente tratado a través de un proceso de descruce para eliminar las impurezas naturales como ceras, pectinas, proteínas y otras sustancias no celulósicas, así como impurezas provenientes de su procesamiento tales como el material desengomado, suciedad y aceites que le confieren una capa hidrofóbica.

Para el proceso de descruce se requirió de una solución caliente entre 80-90 °C de NaOH caustica a una concentración (40-100 gr/L al 100%) y humectantes con un tiempo de permanencia de 30-45 minutos, a fin de asegurar la eliminación completa de compuestos no deseados y hacer que el hilo de algodón sea hidrofílico (que absorba agua) y así permitir que reactivos penetren uniformemente en la fibra. En la Figura 10 se presenta la curva del proceso de descruce utilizado. Posteriormente los hilos fueron sometidos a un proceso de lavado con agua a temperatura ambiente (25 °C).

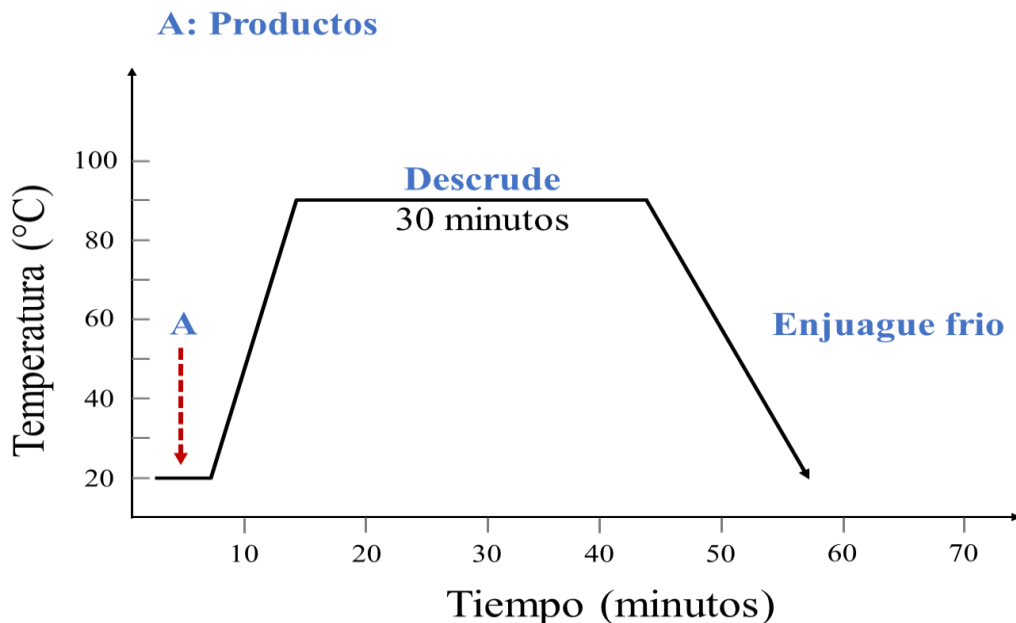


Figura 10. Proceso de descrude de los hilos de algodón.

En el proceso de blanqueo, el hilo fue sumergido en una solución de peróxido de hidrogeno (H_2O_2) a una concentración de 2 gr/L por un tiempo de 30 minutos a una temperatura de 85 °C (ver Figura 11). Durante el proceso de blanqueo este debe ser estabilizado para controlar la rápida reacción del ion perhidroxilo (HO_2^-) y la descomposición del H_2O_2 en oxígeno molecular (O_2) evitando la destrucción catalítica y el deterioro químico de la fibra. Entre los estabilizadores más eficaces del H_2O_2 está el silicato de sodio (Na_2O_3Si), el cual evita la acción de los productos catalíticos como las sales de metales pesados o sus iones, tiene la propiedad de actuar como tapón frente al álcali.

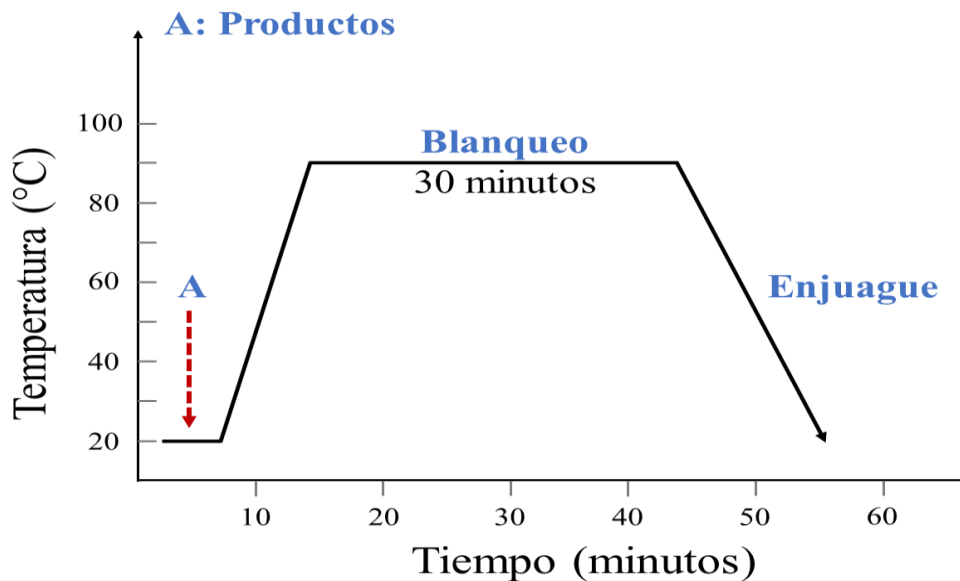


Figura 11. Proceso de blanqueo de los hilos de algodón.

3.3 Adsorción *in situ* de NPs de Ag en hilos de algodón

Los hilos de algodón 100% se les dio un prelavado, asegurando que la superficie del hilo este limpia, accesible y tenga una reactividad óptima para una buena adhesión y dispersión de las NPs de Ag.

3.3.1 Lavado de los hilos de algodón

Los hilos de algodón previamente fueron lavados con jabón neutro y enjuagados con suficiente agua desionizada todo a temperatura de 65°C y en agitación a 80 revoluciones por minuto (rpm) durante 10 minutos. Para eliminar las impurezas presentes, los hilos fueron tratados térmicamente a 75 °C durante 15 min. En la Figura 12 se presenta imágenes de las etapas de lavado de los hilos de algodón.

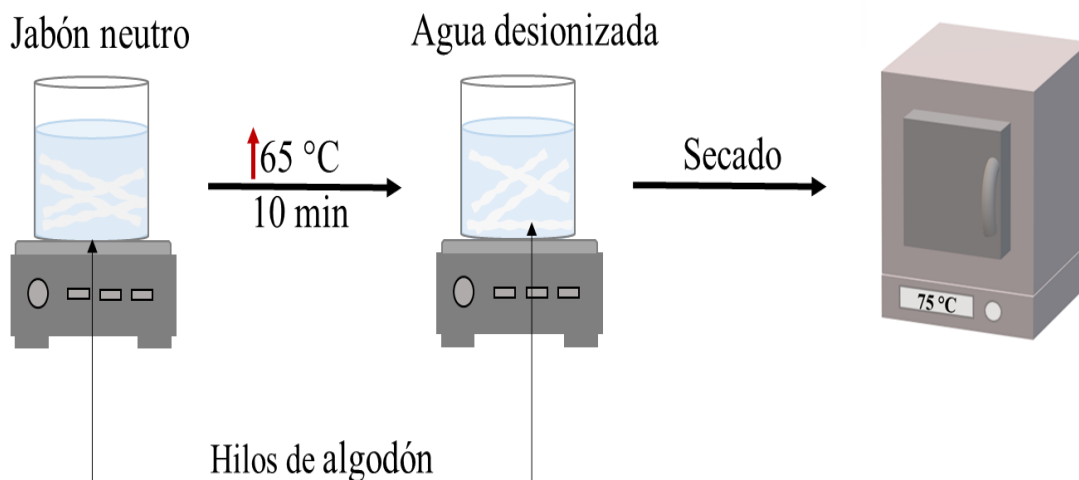


Figura 12. Proceso de lavado de los hilos algodón.

3.3.2 Activación química superficial de los hilos (Celulosa-Sodio)

Después del proceso de lavado, los hilos de algodón fueron activados químicamente. En la Figura 13, se muestra el proceso de activación química de los hilos de algodón. Para lo cual, se preparó una solución de hidróxido de sodio (0.5 M) en agua desionizada a temperatura ambiente bajo agitación moderada. Posteriormente, los hilos fueron sumergidos en la solución de NaOH durante 30 min manteniendo la agitación moderada. Finalmente, los hilos fueron lavados con agua desionizada para remover el exceso de NaOH y obtener una superficie de “Celulosa-Sodio”.

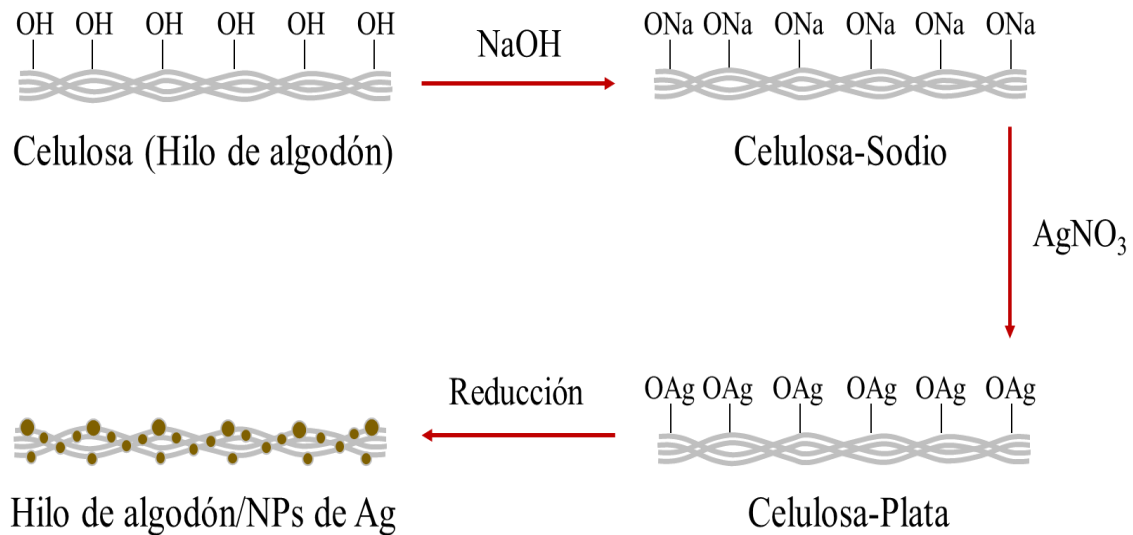


Figura 13. Imágenes de la etapa de activación química superficial de los hilos de algodón con NaOH.

3.3.3 Síntesis *in situ* de nanopartículas de plata sobre hilos de algodón

Se prepararon por separado soluciones acuosas de AgNO₃ (0.010, 0.005 y 0.001M) denotadas como muestras (a), (b) y (c) respectivamente, posteriormente se sumergieron los hilos de algodón celulosa activados químicamente previamente con NaOH a las soluciones de AgNO₃ bajo agitación moderada por 15 min a temperatura ambiente (25°C), para el intercambio de los iones sodio por los iones de Ag. Al término del intercambio iónico, las muestras fueron enjuagadas con agua desionizada para eliminar exceso de reactivos y tratadas térmicamente a 90 °C por 45 min. Muestras de “Hilos de Algodón Celulosa/Plata” fueron obtenidas. Para la formación *in situ* de las nanopartículas de Ag, las muestras de Hilos de Algodón Celulosa/Plata fueron sumergidas en una solución reductora (0.0001M) por 20 minutos con agitación moderada en vasos de vidrio de 25 ml. La formación de las nanopartículas de plata fue observada de manera instantánea sobre la superficie del textil producto del proceso de nucleación y crecimiento. Un cambio de color de blanco a café oscuro fue observado

producto de la formación de partículas de Ag en la escala nanométrica. Al término de la formación de las nanopartículas, los hilos de algodón conteniendo nanopartículas fueron lavados con agua desionizada y sometidos a un tratado térmico a 75 °C durante 70 min (Figura 14) para asegurar el anclaje de las nanopartículas de Ag. Muestras denotadas como “Hilos de Algodón/NPs de Ag” fueron obtenidas al término de esta etapa.

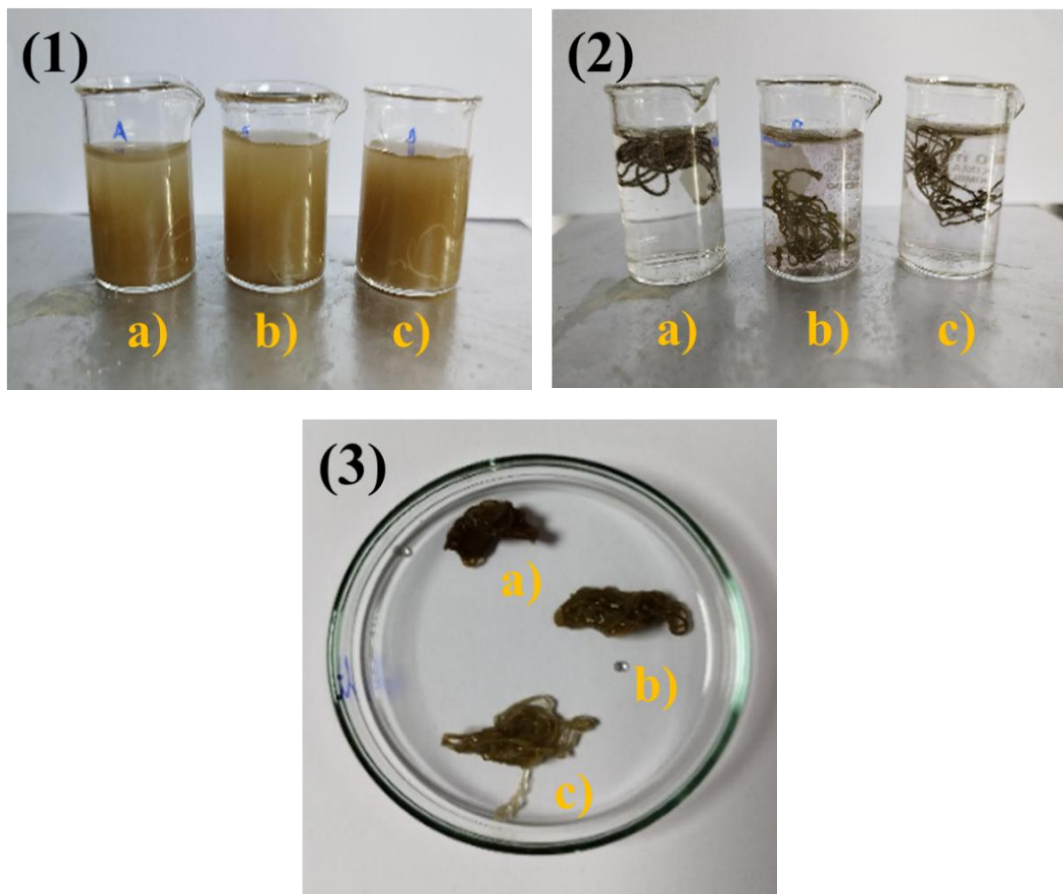


Figura 14. Imágenes de las etapas de la síntesis *in situ* de nanopartículas de Ag sobre los hilos de algodón: (1) hilos en las soluciones de AgNO₃, (2) hilos en las soluciones reductoras, y (3) hilos durante el tratamiento térmico a 75 °C.

3.3.4 Actividad antibacterial de los hilos de algodón/NPs Ag

Para evaluar la actividad inhibitoria de los nanohilos de Ag contra *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) se realizó por el método de difusión en agar Dextrosa Sabouraud como se describe en la sección 2.6.1. El agar se depositó en cajas Petri estériles y se sembró el microorganismo sobre la superficie del agar. Los nanohilos se depositaron en el centro del agar con *S. aureus* e incubados a 38°C durante 72 horas (ver Figura 15). Hilos de algodón sin NPs de Ag fueron usados como grupo control. Se analizó la formación de zonas de inhibición alrededor de los nanohilos de Ag en contacto con *S. aureus* y se midió la longitud de cada zona de inhibición. El ensayo de inhibición se realizó por triplicado.

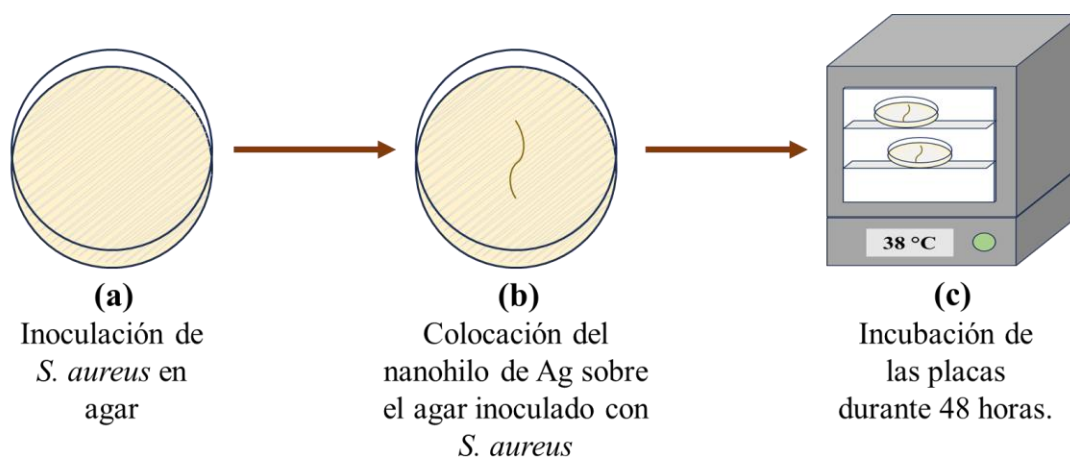


Figura 15. Esquema del arreglo experimental para la determinación de la actividad antimicrobiana de los nanohilos de Ag contra *S. aureus*.

CAPÍTULO 4



4. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la funcionalización de hilos de algodón con nanopartículas de Ag y su influencia en el desarrollado de hilos de algodón con propiedad funcional antibacterial. Se presentan y discuten los resultados del efecto de la variación en la concentración de AgNO_3 en la formación y propiedades estructurales de las nanopartículas de Ag sintetizadas *in situ* sobre los hilos de algodón. Se presentan las propiedades de funcionalidad antibacterial desarrolladas en los hilos de algodón en función de la presencia de las nanopartículas de plata.

4.1 Activación química de los hilos de algodón

La activación química de los hilos de algodón fue desarrollada utilizando las condiciones experimentales discutidas en la sección 3.2.2. Los átomos de hidrógeno son sustituidos por los iones de sodio para dar Celulosa-Sodio. Esta reacción es confinada en la superficie de los hilos de algodón sin alterar las propiedades propias de los hilos. En la Figura 16 se presenta una imagen de los hilos algodón activado químicamente, la imagen de los hilos sin tratamiento también es presentada como referencia. Después del proceso de activación química con NaOH, los hilos de algodón no presentan algún cambio aparente en sus propiedades físicas.

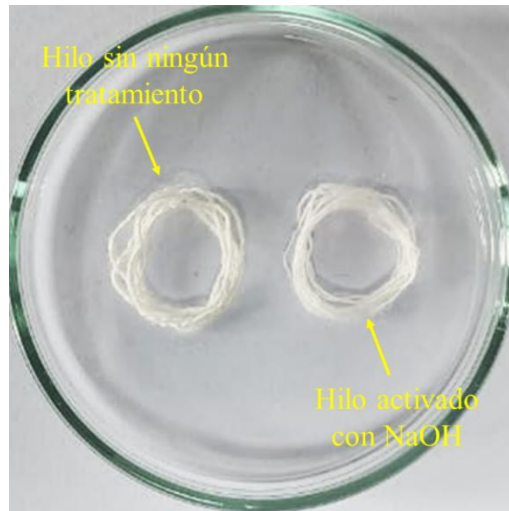


Figura 16. Hilos de algodón sin tratamiento y activado químicamente.

4.2 Formación *in situ* de nanopartículas de plata sobre los hilos de algodón

Los hilos de algodón presentaron un cambio de coloración de blanco a café-oscuro después del tratamiento con AgNO_3 , lo cual indica la formación de una capa de iones de plata sobre la superficie del hilo. Un color oscuro más intenso fue desarrollo en los hilos de algodón utilizando el agente reductor. Estos cambios de coloración revelan la formación *in situ* de partículas de plata en la escala nanométrica. La intensidad de la coloración es producto de la alta densidad de nanopartículas presentes sobre las fibras de algodón.

En la Figura 17 se muestra una imagen de los hilos de algodón obtenida antes y después de la síntesis *in situ* de las NPs de Ag utilizando diferentes concentraciones de AgNO_3 . En las imágenes, también se presentan hilos de algodón sin nanopartículas de Ag. La diferencia de coloración obscura después de la síntesis *in situ* es claramente observada.

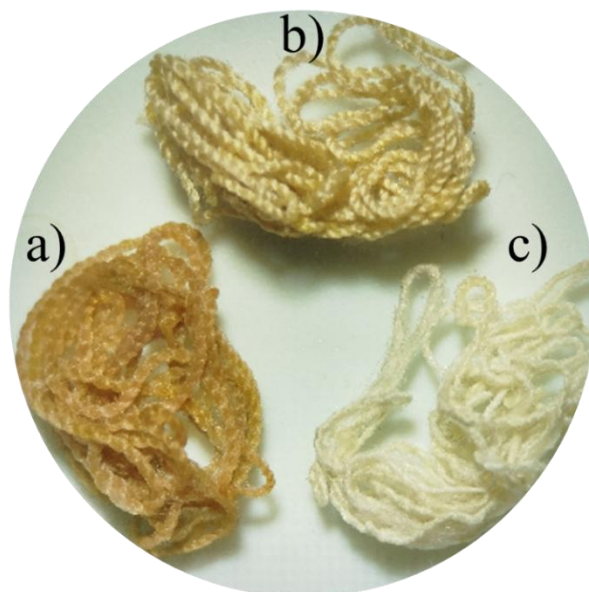


Figura 17. Muestras de hilos de algodón con/sin nanopartículas de Ag, a diferentes concentraciones de AgNO_3 : a) 0.010M, b) 0.005M y c) 0.001M.

4.3 Caracterización de los nanohilos de Ag

4.3.1 Espectroscopia UV-Visible

Para verificar la formación y tamaño nanométrico de las partículas de Ag sobre los hilos de algodón, espectros de absorción óptica de las partículas presentes en la superficie de los hilos fueron obtenidos. Las muestras de “Hilos de algodón/NPs-Ag” (nanohilos de Ag) fueron sacudidas suavemente en una solución ácida de H_2SO_4 (0.1 M) para separar las partículas de Ag de la superficie del textil, las partículas dispersadas en la solución ácida fueron redispersadas en 2.5 ml de H_2O desionizada. La solución obtenida se caracterizó ópticamente utilizando un espectrofotómetro de UV-Vis (Thermo Scientific, modelo: Genesys 10S).

En la Figura 18 se presenta el espectro de absorción de la dispersión coloidal conteniendo nanopartículas de Ag obtenidas de cada uno de los “Hilos de

algodón/NPs-Ag”. Las curvas en el rango UV-Vis son características de dispersiones coloidales conteniendo partículas de Ag en escala nanométrica. Una banda de absorción de fuerte intensidad a 400 nm es observada, producto de la presencia de la resonancia de plasmón de superficie de las nanopartículas de Ag. La posición y la anchura de la banda de absorción del plasmón dependen del tamaño y de la forma de las nanopartículas. A medida que las nanopartículas de Ag disminuyen su tamaño, la longitud de onda del plasmón se desplaza hacia la zona ultravioleta del espectro electromagnético de longitudes de onda menores (de mayor energía) (Waseda *et al.*, 2011). Mayores tamaños de partícula de Ag corresponden desplazamientos hacia la zona visible del espectro electromagnético (menores energías). El espectro presenta ensanchamiento y asimetría del máximo de absorción, el cual puede ser atribuidos a la formación de nanopartículas de Ag de diferentes tamaños y formas (Saion *et al.*, 2013), pero también pudiera estar indicando la aglomeración de nanopartículas de Ag, ya que se observa absorción en el rango de 400-600 nm (Saion *et al.*, 2013). No obstante, las resonancias de plasmón para las nanopartículas de Ag de morfología esférica, es frecuentemente observada en el rango de 380-430 nm.

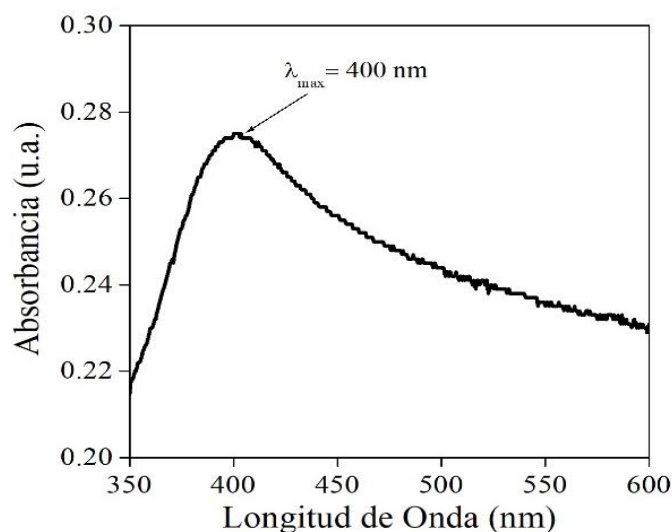


Figura 18. Espectro UV-Vis de NPs de Ag, utilizando una concentración de 0.01M de AgNO₃.

4.3.2 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

La morfología superficial de los hilos de algodón con la síntesis *in situ* de nanopartículas de plata fue observada utilizando el microscopio electrónico de barrido (SEM, marca: Vega Tescan, modelo: TS5136SB).

En la Figura 19 se presentan las micrografías SEM obtenidas de las muestras “Hilos de algodón/NPs de Ag”. En las que se puede observar los hilos conteniendo superficialmente las NPs de Ag sintetizadas con diferentes concentraciones de AgNO_3 (a) 0.01M, (b) 0.005M y (c) 0.001M. Es posible observar la formación y características estructurales de partículas en la superficie de los hilos de algodón. Mayor densidad de NPs de Ag presentes en los hilos de algodón pueden ser observadas en la imagen donde se utilizó 0.01M de AgNO_3 . Menor densidad de partículas es observada con las concentraciones de 0.005 y 0.001M de AgNO_3 . De las imágenes, también es de notarse que con la presencia de las nanopartículas de Ag en la superficie del hilo se desarrolla una rugosidad con perfil nanométrico sobre el hilo de algodón generando la multiplicidad del ángulo de contacto del hilo. Se puede observar la presencia de pequeñas partículas sintetizadas en la superficie de los hilos de algodón.

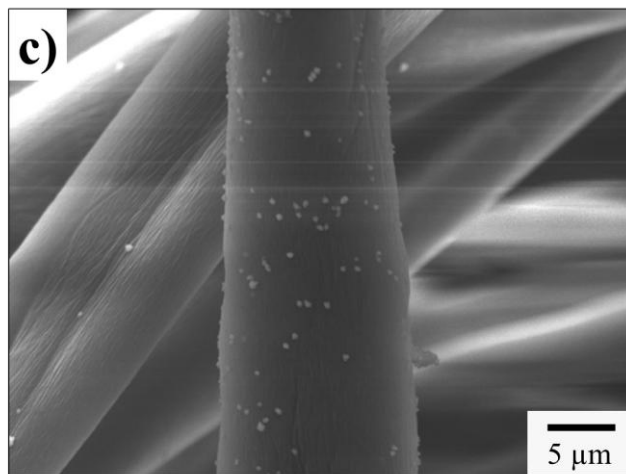
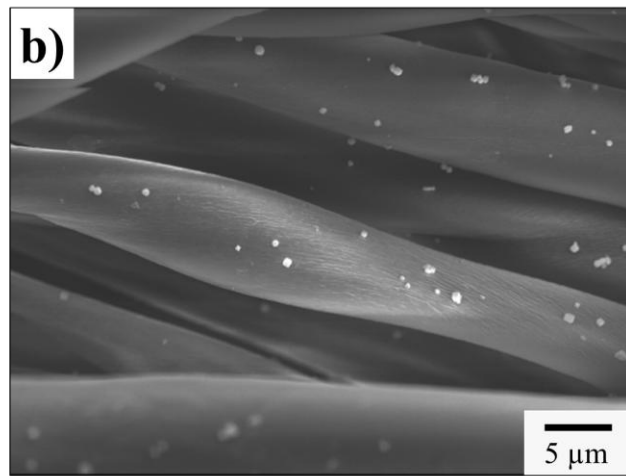
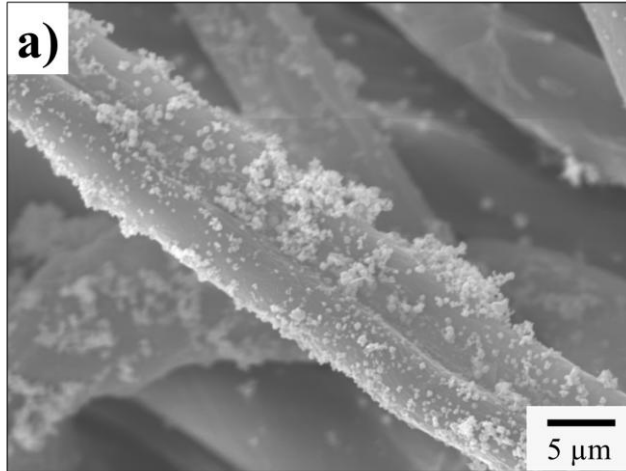


Figura 19. Micrografías SEM de nanohilos de Ag utilizando diferentes concentraciones de AgNO_3 : a) 0.010M, b) 0.005M y c) 0.001M.

4.3.3 Espectroscopia de energía dispersa (EDS)

Los elementos de la composición química de las muestras de los nanohilos fueron determinados por espectroscopia EDS y son presentados en la Figura 20. La figura muestra los espectros EDS de los nanohilos con NPs de Ag sintetizadas con diferentes concentraciones de AgNO_3 . En las señales EDS del hilo sin NPs se detectaron diferentes picos de energía correspondientes al C, Ca y O presentes en el hilo de algodón. Sin embargo, después de la síntesis *in situ* de NPs de Ag utilizando los diferentes de AgNO_3 , una nueva señal de energía es observada a 3 keV en todas las muestras de nanohilos y que se atribuye a la plata en estado metálico (Figuras 12a y b). Estos resultados corroboran la presencia de la plata en los hilos de algodón.

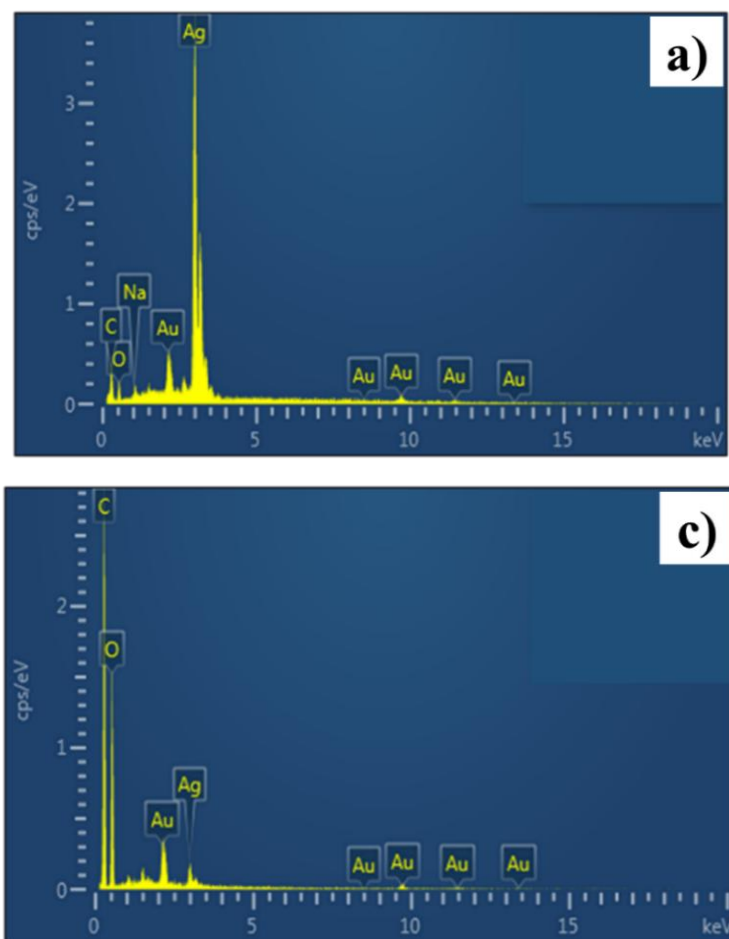


Figura 20. Espectros EDS de nanohilos de Ag obtenidos con diferentes concentraciones de AgNO_3 : a) 0.010M y c) 0.001M.

4.3.4 Difracción de rayos X

Para cuantificar las propiedades estructurales de los nanohilos, difractogramas de rayos X fueron obtenidos mediante un difractómetro modelo Siemens D5000. Los resultados de la caracterización son presentados en la Figura 21. El difractograma obtenido del hilo sin NPs de Ag es presentado como referencia (Figura 20a). Los difractogramas de los nanohilos de Ag presentan señales de difracción a 2θ en 38.1° , 44.3° , 64.5° y 77.5° (Figura 20b) que corresponden a los planos (111), (200), (220) y (311) de la plata en estado cristalino. Para predecir el tamaño de las partículas de Ag,

se utilizó la ecuación de Scherrer (Saion *et al.*, 2013), en el pico correspondiente al (111) de cada una de los nanohilos obtenidos con diferente reductor. El difractograma de la Figura 13b corresponde al nanohilo de Ag obtenido con la concentración de 0.01M de AgNO₃ y muestra que el tamaño de partícula de Ag presente en la superficie del nanohilo 19.5 nm. Es claro que las partículas de Ag sintetizadas *in situ* son de estructura tipo cristalina y el tamaño promedio de las partículas se encuentra en la escala nanométrica. Estos resultados corroboran a los obtenidos por espectroscopía UV-Vis, SEM y EDS.

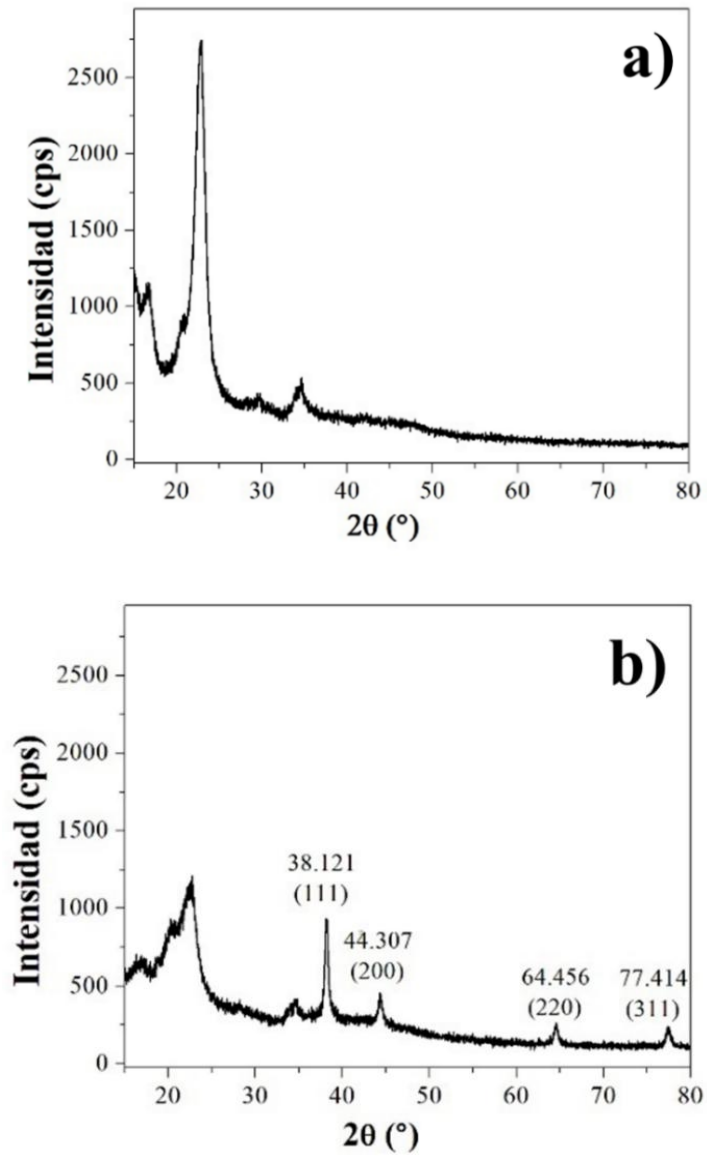


Figura 21. Difractogramas de rayos X del (a) hilo de algodón sin nanopartículas y (b) nanohilo de Ag utilizando la concentración de 0.01M de AgNO₃.

4.4 Propiedades funcionales de los nanotextiles

En esta parte de la tesis se presentan las características funcionales de los diferentes nanohilos de Ag obtenidos. El efecto de presencia, tamaño de las nanopartículas de Ag en la propiedad antibacterial, es discutido.

4.4.3 Propiedad antibacterial de nanohilos/NPs-Ag

La Figura 22 muestra la actividad antibacterial del hilo de algodón sin funcionalizar como control y el hilo de algodón funcionalizado con las NPs de Ag después de 72 horas de incubación. El hilo funcionalizado muestra una excelente reducción bacteriana contra la bacteria *S. aureus* obteniendo una zona de inhibición promedio de 2.5 cm, lo que indica que el nanohilo de Ag posee actividad antibacteriana. En cambio, el hilo de algodón de control no mostró ninguna zona de inhibición y el crecimiento de *S. aureus* se observó sobre y cerca del hilo.

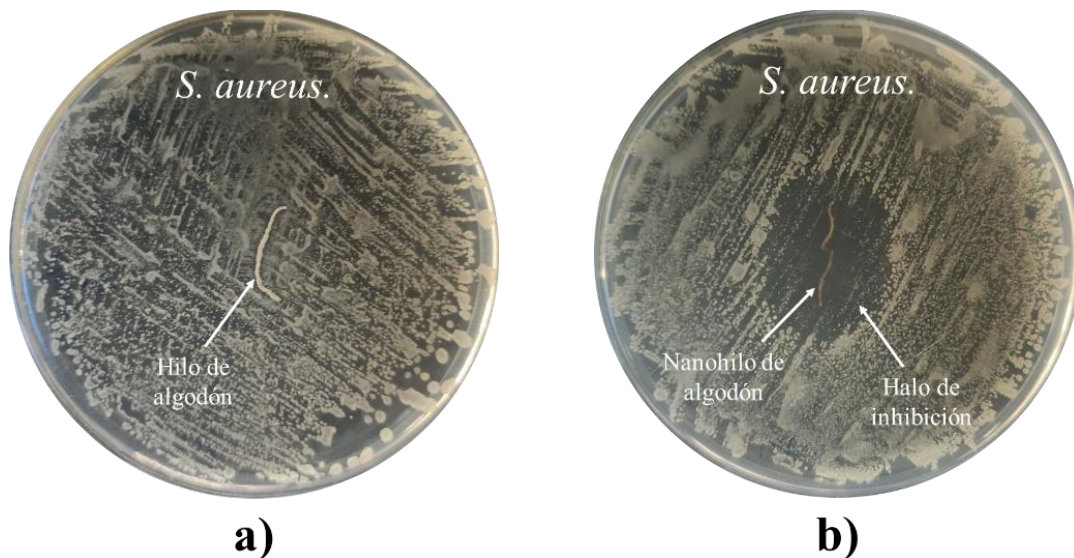


Figura 22. Actividad antibacteriana de hilos de algodón: a) sin NPs de Ag y b) con NPs Ag.

Kim *et al.* (2006) reportaron un posible mecanismo de acción antibacterial de las NPs de Ag, causando anormalidades en la pared celular y la membrana de las células bacterianas, lo que provoca diversos cambios morfológicos. La plata tiene carga positiva y, por lo tanto, tiende a reaccionar con biomoléculas con carga negativa, como el fósforo y el azufre, que son los principales componentes de la membrana celular, las proteínas y las bases del ADN. Aunque la razón exacta del efecto antimicrobiano de las NPs de Ag en las bacterias aún no se ha aclarado, el tamaño juega un papel importante en la actividad antibacteriana. Ya que en diversos estudios (Huh & Kwon, 2011), demuestran que cuanto menor sea la dimensión de la nanopartícula, mayor es la capacidad de penetrar la pared celular, dificultar la replicación del ADN y la reproducción celular, o incluso provocar la muerte de bacterias gram positivas (*Staphylococcus aureus*) o gram negativas (More *et al.*, 2023).

CAPÍTULO 5



5.1 Conclusiones

En este trabajo de investigación se desarrolló exitosamente la síntesis controlada *in situ* de nanopartículas de Ag sobre hilos de algodón para el desarrollo de nuevos hilos funcionales (nanohilos de Ag).

La formación, densidad y homogeneidad de las partículas de Ag fueron controladas variando la concentración del agente precursor AgNO_3 . Nanopartículas de Ag bien definidas con tamaños de 19.5 nm fueron obtenidas con 0.01M, 0.005M y 0.001M respectivamente.

Utilizando la espectroscopia de UV-Vis fue posible monitorear la presencia y formación de las nanopartículas de Ag a través de la presencia y posición de la resonancia del plasmón superficial de las nanopartículas.

La presencia y tamaño de NPs Ag sobre la superficie de los hilos de algodón fue corroborada mediante la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido. Mayor densidad de nanopartículas de Ag fue observada en el hilo de algodón utilizando 0.01M de AgNO_3 como agente precursor.

El análisis de Espectroscopia de energía dispersa (EDS) reveló la composición y el estado metálico de las nanopartículas metálicas.

La calidad cristalina y tamaño nanométrico de las partículas de Ag fue obtenida utilizando la Difracción de rayos-X.

Los nanohilos mostraron excelentes propiedades de antibacteriales contra *Staphylococcus aureus* observándose halos de inhibición de 1.5 cm en comparación con el hilo de algodón sin NPs Ag el cual no tuvo ningún efecto antibacterial.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbasi**, E., Milani, M., Aval, S. F., Kouhi, M., Akbarzadeh, A., Nasrabadi, H. T., Nikasa, P., Joo, S. W., Hanifehpour, Y., Nejati-Koshki, K., & Samiei, M. (2014). Silver nanoparticles: Synthesis methods, bio-applications and properties. *Critical Reviews in Microbiology*, 1–8. <https://doi.org/10.3109/1040841x.2014.912200>
- Abbaszadegan**, A., Ghahramani, Y., Gholami, A., Hemmateenejad, B., Dorostkar, S., Nabavizadeh, M., & Sharghi, H. (2015). The Effect of Charge at the Surface of Silver Nanoparticles on Antimicrobial Activity against Gram-Positive and Gram-Negative Bacteria: A Preliminary Study. *Journal of Nanomaterials*, 2015(1). <https://doi.org/10.1155/2015/720654>
- Aguilar Méndez**, M. A. (2007). *Síntesis y caracterización de nanopartículas de plata: efecto sobre Collectotrichum gloesporioides* [Tesis Doctoral]. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del IPN.
- Bamal**, D., Singh, A., Chaudhary, G., Kumar, M., Singh, M., Rani, N., Mundlia, P., & Sehrawat, A. R. (2021). Silver nanoparticles biosynthesis, characterization, antimicrobial activities, applications, cytotoxicity and safety issues: An updated review. *Nanomaterials*, 11(8), 2086. <https://doi.org/10.3390/nano11082086>
- Bauer**, A. W., Kirby, W. M., Sherris, J. C., & Turck, M. (1966). Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method. *American Journal of Clinical Pathology*, 45(4), 493–496.
- Bedeloglu**, A., Sunter, N., Yildirim, B., & Bozkurt, Y. (2012). Bending and tensile properties of cotton/metal wire complex yarns produced for electromagnetic shielding and conductivity applications. *Journal of the Textile Institute*, 103(12), 1304–1311. <https://doi.org/10.1080/00405000.2012.677568>

- Bönnemann**, H., Brijoux, W., Siepen, K., Hormes, J., Franke, R., Pollmann, J., & Rothe, J. (1997). Surfactant stabilized palladium colloids as precursors for cis-selective alkyne-hydrogenation catalysts. *Applied Organometallic Chemistry*, *11*, 783–796.
- Boucher**, H. W., & Corey, G. R. (2008). Epidemiology of Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*. *Clinical Infectious Diseases*, *46*(S5), S344–S349. <https://doi.org/10.1086/533590>
- Bunaciu**, A. A., Udriștioiu, E. G., & Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, *45*(4), 289–299. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
- Cao**, X. B., Gu, L., Zhuge, L. J., Gao, W. J., Wang, W. C., & Wu, S. F. (2006). Template-Free preparation of hollow SB2S3 microspheres as supports for Ag nanoparticles and photocatalytic properties of the constructed Metal–Semiconductor nanostructures. *Advanced Functional Materials*, *16*(7), 896–902. <https://doi.org/10.1002/adfm.200500422>
- Cavassin**, E. D., De Figueiredo, L. F. P., Otoch, J. P., Seckler, M. M., De Oliveira, R. A., Franco, F. F., Marangoni, V. S., Zucolotto, V., Levin, A. S. S., & Costa, S. F. (2015). Comparison of methods to detect the in vitro activity of silver nanoparticles (AgNP) against multidrug resistant bacteria. *Journal of Nanobiotechnology*, *13*(1). <https://doi.org/10.1186/s12951-015-0120-6>
- Cheng**, Y., Wang, R., Sun, J., & Gao, L. (2015). Highly Conductive and Ultrastretchable Electric Circuits from Covered Yarns and Silver Nanowires. *ACS Nano*, *9*(4), 3887–3895. <https://doi.org/10.1021/nn5070937>
- Cherenack**, K., & Van Pieterse, L. (2012). Smart textiles: Challenges and opportunities. *Journal of Applied Physics*, *112*(9). <https://doi.org/10.1063/1.4742728>

- Choi, O., Yu, C., Fernández, G. E., & Hu, Z. (2010).** Interactions of nanosilver with *Escherichia coli* cells in planktonic and biofilm cultures. *Water Research*, *44*(20), 6095–6103. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.069>
- Chouhan, N. (2018).** Silver nanoparticles: synthesis, characterization and applications. In *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75611>
- Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2013).** *Elements of X-Ray Diffraction* (3rd ed.). Pearson New International Edition.
- Dastjerdi, R., & Montazer, M. (2010).** A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties. *Colloids and Surfaces B Biointerfaces*, *79*(1), 5–18. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.03.029>
- Datye, A., & DeLaRiva, A. (2023).** Scanning Electron Microscopy (SEM). In *Springer handbooks* (pp. 359–380). https://doi.org/10.1007/978-3-031-07125-6_18
- Dev, V. G., Venugopal, J., Sudha, S., Deepika, G., & Ramakrishna, S. (2008).** Dyeing and antimicrobial characteristics of chitosan treated wool fabrics with henna dye. *Carbohydrate Polymers*, *75*(4), 646–650. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.09.003>
- Eker, F., Duman, H., Akdaşçi, E., Bolat, E., Sarıtaş, S., Karav, S., & Witkowska, A. M. (2024).** A comprehensive review of nanoparticles: from classification to application and toxicity. *Molecules*, *29*(15), 3482. <https://doi.org/10.3390/molecules29153482>
- El-Nour, K. M. A., Eftaiha, A., Al-Warthan, A., & Ammar, R. A. (2010).** Synthesis and applications of silver nanoparticles. *Arabian Journal of Chemistry*, *3*(3), 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.04.008>

- Gao, N. Y., & Cranston, R. (2008).** Recent advances in antimicrobial treatments of textiles. *Textile Research Journal*, 78(1), 60–72. <https://doi.org/10.1177/0040517507082332>
- Giannossa, L. C., Longano, D., Ditaranto, N., Nitti, M. A., Paladini, F., Pollini, M., Rai, M., Sannino, A., Valentini, A., & Cioffi, N. (2013).** Metal nanoantimicrobials for textile applications. *Nanotechnology Reviews*, 2(3), 307–331. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2013-0004>
- Gokarneshan, N. (2018).** A review of some significant insights on nano finishing of protein fibres. *Journal of Nanoscience & Nanotechnology Research*, 2(1:4), 1–9.
- Gowri, V. S., Almeida, L., De Amorim, M. T. P., Pacheco, N. C., Souto, A. P., Esteves, M. F., & Sanghi, S. K. (2010).** Functional finishing of polyamide fabrics using ZnO–PMMA nanocomposites. *Journal of Materials Science*, 45(9), 2427–2435. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4210-4>
- Guo, Q., Ghadiri, R., Weigel, T., Aumann, A., Gurevich, E., Esen, C., Medenbach, O., Cheng, W., Chichkov, B., & Ostendorf, A. (2014).** Comparison of in Situ and ex Situ Methods for Synthesis of Two-Photon Polymerization Polymer Nanocomposites. *Polymers*, 6(7), 2037–2050. <https://doi.org/10.3390/polym6072037>
- Guo, Y., Tao, X., Xu, B., Feng, J., & Wang, S. (2010).** Structural characteristics of low torque and ring spun yarns. *Textile Research Journal*, 81(8), 778–790. <https://doi.org/10.1177/0040517510387213>
- Güzel, R., & Erdal, G. (2018).** Synthesis of silver nanoparticles. In *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75363>

- Hao**, E., Kelly, K. L., Hupp, J. T., & Schatz, G. C. (2002). Synthesis of silver nanodisks using polystyrene mesospheres as templates. *Journal of the American Chemical Society*, *124*(51), 15182–15183. <https://doi.org/10.1021/ja028336r>
- Hari**, P. K. (2019). Types and properties of fibres and yarns used in weaving. In *Elsevier eBooks* (pp. 3–34). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102497-3.00001-5>
- He**, J., Kunitake, T., & Nakao, A. (2003). Facile in situ synthesis of noble metal nanoparticles in porous cellulose fibers. *Chemistry of Materials*, *15*(23), 4401–4406. <https://doi.org/10.1021/cm034720r>
- Hebeish**, A., El-Naggar, M., Fouda, M. M., Ramadan, M., Al-Deyab, S. S., & El-Rafie, M. (2011). Highly effective antibacterial textiles containing green synthesized silver nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, *86*(2), 936–940. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.05.048>
- Holme**, I. (2007). Innovative technologies for high performance textiles. *Coloration Technology*, *123*(2), 59–73. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2007.00064.x>
- Hossain**, T. J. (2024). Methods for screening and evaluation of antimicrobial activity: A review of protocols, advantages, and limitations. *European Journal of Microbiology and Immunology*, *14*(2), 97–115. <https://doi.org/10.1556/1886.2024.00035>
- Huh**, A. J., & Kwon, Y. J. (2011). “Nanoantibiotics”: A new paradigm for treating infectious diseases using nanomaterials in the antibiotics resistant era. *Journal of Controlled Release*, *156*(2), 128–145. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2011.07.002>

- Jayadevan, S., Aliyana, A. K., & Stylios, G. (2024).** An overview of advances and challenges in developing nanofiber yarns for wearable technology. *Nano Energy*, *129*, 110034. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2024.110034>
- Jiang, W., Mashayekhi, H., & Xing, B. (2009).** Bacterial toxicity comparison between nano- and micro-scaled oxide particles. *Environmental Pollution*, *157*(5), 1619–1625. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.12.025>
- Jin, R., Cao, Y. C., Hao, E., Métraux, G. S., Schatz, G. C., & Mirkin, C. A. (2003).** Controlling anisotropic nanoparticle growth through plasmon excitation. *Nature*, *425*(6957), 487–490. <https://doi.org/10.1038/nature02020>
- Joshi, M., & Bhattacharyya, A. (2011).** Nanotechnology – a new route to high-performance functional textiles. *Textile Progress*, *43*(3), 155–233. <https://doi.org/10.1080/00405167.2011.570027>
- Kambale, E. K., Nkanga, C. I., Mutonkole, B. I., Bapolisi, A. M., Tassa, D. O., Liesse, J. I., Krause, R. W., & Memvanga, P. B. (2020).** Green synthesis of antimicrobial silver nanoparticles using aqueous leaf extracts from three Congolese plant species (*Brillantaisia patula*, *Crossopteryx febrifuga* and *Senna siamea*). *Heliyon*, *6*(8), e04493. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04493>
- Kan, C. W. (2007).** Evaluating antistatic performance of plasma-treated polyester. *Fibers and Polymers*, *8*(6), 629–634. <https://doi.org/10.1007/bf02876001>
- Kiekens, P., Van Der Burght, E., Kny, E., Uyar, T., & Milašius, R. (2014).** Functional textiles – from research and development to innovations and industrial uptake. *Autex Research Journal*, *14*(4), 219–225. <https://doi.org/10.2478/aut-2014-0031>

- Kim, D., Jeong, S., & Moon, J. (2006).** Synthesis of silver nanoparticles using the polyol process and the influence of precursor injection. *Nanotechnology*, 17(16), 4019–4024. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/16/004>
- Kim, J., Cha, S., Shin, K., Jho, J. Y., & Lee, J. (2004).** Preparation of Gold Nanowires and Nanosheets in Bulk Block Copolymer Phases under Mild Conditions. *Advanced Materials*, 16(5), 459–464. <https://doi.org/10.1002/adma.200305613>
- Kimura, K., & Bandow, S. (1983).** The study of metal colloids produced by means of gas evaporation Technique. i. Preparation method and optical properties in ethanol. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 56(12), 3578–3584. <https://doi.org/10.1246/bcsj.56.3578>
- Laga, S. K., & Wasif, A. I. (2009).** USE OF NANO SILVER AS AN ANTIMICROBIAL AGENT FOR COTTON. *Autex Research Journal*, 9(1), 5–13. <https://doi.org/10.1515/aut-2009-090102>
- Lal, S., Link, S., & Halas, N. J. (2007).** Nano-optics from sensing to waveguiding. *Nature Photonics*, 1(11), 641–648. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.223>
- Lawrence, C. A. (2003).** Fundamentals of spun yarn Technology. In *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/9780203009581>
- Lee, H. J., & Jeong, S. H. (2005).** Bacteriostasis and skin innocuousness of nanosize silver colloids on textile fabrics. *Textile Research Journal*, 75(7), 551–556. <https://doi.org/10.1177/0040517505053952>
- Lee, N. H. J., & Jeong, N. S. H. (2004).** Bacteriostasis of nanosized colloidal silver on polyester nonwovens. *Textile Research Journal*, 74(5), 442–447. <https://doi.org/10.1177/004051750407400511>

- Li, S.,** Lewis, J. E., Stewart, N. M., Qian, L., & Boyter, H. (2008). Effect of finishing methods on washing durability of microencapsulated aroma finishing. *Journal of the Textile Institute*, 99(2), 177–183. <https://doi.org/10.1080/00405000701489701>
- Li, Z.,** Meng, J., Wang, W., Wang, Z., Li, M., Chen, T., & Liu, C. (2017). The room temperature electron reduction for the preparation of silver nanoparticles on cotton with high antimicrobial activity. *Carbohydrate Polymers*, 161, 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.01.020>
- Link, S.,** & El-Sayed, M. A. (1999). Spectral properties and relaxation dynamics of surface plasmon electronic oscillations in gold and silver nanodots and nanorods. *The Journal of Physical Chemistry B*, 103(40), 8410–8426. <https://doi.org/10.1021/jp9917648>
- Liu, H.,** Tao, X., Choi, K., & Xu, B. (2009). Analysis of the relaxation modulus of spun yarns. *Textile Research Journal*, 80(5), 403–410. <https://doi.org/10.1177/0040517509342315>
- Loo, Y. Y.,** Rukayadi, Y., Nor-Khaizura, M., Kuan, C. H., Chieng, B. W., Nishibuchi, M., & Radu, S. (2018). In vitro antimicrobial activity of green synthesized silver nanoparticles against selected gram-negative foodborne pathogens. *Frontiers in Microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01555>
- Lowy, F. D.** (1998). Staphylococcus aureus Infections. *New England Journal of Medicine*, 339(8), 520–532. <https://doi.org/10.1056/nejm199808203390806>
- Ltly.** (2024, December 6). Understanding textile pretreatment process for optimal dyeing. *Textile Tester*. <https://es.darongtester.com/textile-pretreatment/>

- Lu, P., Teranishi, T., Asakura, K., Miyake, M., & Toshima, N. (1999).** Polymer-Protected Ni/PD Bimetallic Nano-Clusters: Preparation, characterization and catalysis for hydrogenation of nitrobenzene. *The Journal of Physical Chemistry B*, *103*(44), 9673–9682. <https://doi.org/10.1021/jp992177p>
- Mabuchi, M., Takenaka, T., Fujiyoshi, Y., & Uyeda, N. (1982).** Surface enhanced Raman scattering of citrate ions adsorbed on gold sol particles. *Surface Science*, *119*(2–3), 150–158. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(82\)90289-8](https://doi.org/10.1016/0039-6028(82)90289-8)
- Maier, S. A. (2007).** *Plasmonics Fundamentals and Applications*. (1st ed.). Springer Science+Business Media LLC. pp.21-34, 65-88. eISBN 978-0387-37825-1
- Meda, U. S., Soundarya, V. G., Madhu, H., & Bhat, N. (2023).** Nano-engineered textiles: Development and applications. *Materials Science and Engineering B*, *296*, 116636. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116636>
- Mikhailova, E. O. (2020).** Silver nanoparticles: Mechanism of action and Probable Bio-Application. *Journal of Functional Biomaterials*, *11*(4), 84. <https://doi.org/10.3390/jfb11040084>
- Misra, R., Cook, R. D., & Morgan, S. E. (2009).** Nonwetting, nonrolling, stain resistant polyhedral oligomeric silsesquioxane coated textiles. *Journal of Applied Polymer Science*, *115*(4), 2322–2331. <https://doi.org/10.1002/app.31365>
- More, P. R., Pandit, S., De Filippis, A., Franci, G., Mijakovic, I., & Galdiero, M. (2023).** Silver Nanoparticles: Bactericidal and Mechanistic Approach against Drug Resistant Pathogens. *Microorganisms*, *11*(2), 369. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020369>

- Morones**, J. R., Elechiguerra, J. L., Camacho, A., Holt, K., Kouri, J. B., Ramírez, J. T., & Yacaman, M. J. (2005). The bactericidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology*, *16*(10), 2346–2353. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/10/059>
- Muneeswaran**, T., Maruthupandy, M., Mary, A. S., Vennila, T., Rajaram, K., Ramakritinan, C. M., & Quero, F. (2023). Starch-mediated synthesis of chitosan/silver nanocomposites for antibacterial, antibiofilm and wound healing applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, *84*, 104424. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104424>
- Ortega**, M., Saynisch, A., Yurtseven, B., & Gries, T. (2024). A review on False-Twist texturing. *Fibers*, *12*(4), 36. <https://doi.org/10.3390/fib12040036>
- Panáček**, A., Kolář, M., Večeřová, R., Pucek, R., Soukupová, J., Kryštof, V., Hamal, P., Zbořil, R., & Kvítek, L. (2009). Antifungal activity of silver nanoparticles against *Candida* spp. *Biomaterials*, *30*(31), 6333–6340. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.07.065>
- Passos**, M. L., Sarraguça, M. C., Saraiva, M. L. M., Rao, T. P., & Biju, V. (2018). Organic compounds. In *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.14465-8>
- Paul**, R., Bautista, L., De La Varga, M., Botet, J. M., Casals, E., Puentes, V., & Marsal, F. (2009). Nano-cotton Fabrics with High Ultraviolet Protection. *Textile Research Journal*, *80*(5), 454–462. <https://doi.org/10.1177/0040517509342316>
- Perelshtein**, I., Applerot, G., Perkas, N., Guibert, G., Mikhailov, S., & Gedanken, A. (2008). Sonochemical coating of silver nanoparticles on textile fabrics (nylon, polyester and cotton) and their antibacterial activity. *Nanotechnology*, *19*(24), 245705. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/24/245705>

- Qing, Y., Cheng, L., Li, R., Liu, G., Zhang, Y., Tang, X., Wang, J., Liu, H., & Qin, Y.** (2018). Potential antibacterial mechanism of silver nanoparticles and the optimization of orthopedic implants by advanced modification technologies. *International Journal of Nanomedicine, Volume 13*, 3311–3327. <https://doi.org/10.2147/ijn.s165125>
- Quinteros, M., Aristizábal, V. C., Dalmaso, P., Paraje, M., & Páez, P.** (2016). Oxidative stress generation of silver nanoparticles in three bacterial genera and its relationship with the antimicrobial activity. *Toxicology in Vitro, 36*, 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2016.08.007>
- Rai, M., Yadav, A., & Gade, A.** (2008). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances, 27*(1), 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002>
- Rasigade, J., & Vandenesch, F.** (2013). Staphylococcus aureus: A pathogen with still unresolved issues. *Infection Genetics and Evolution, 21*, 510–514. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2013.08.018>
- Ren, X., Kou, L., Kocer, H. B., Zhu, C., Worley, S., Broughton, R., & Huang, T.** (2008). Antimicrobial coating of an N-halamine biocidal monomer on cotton fibers via admicellar polymerization. *Colloids and Surfaces a Physicochemical and Engineering Aspects, 317*(1–3), 711–716. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.12.007>
- Rojas-Lema, S. P., Galeas-Hurtado, S. G., & Guerrero-Barragán, V. H.** (2017). Mejoramiento de la absorción de nanopartículas de plata en telas de algodón, utilizando un ligante. *Revista Facultad De Ingeniería, 26*(45), 109–119. <https://doi.org/10.19053/01211129.v26.n45.2017.6420>

- Sadoon**, A. A., Khadka, P., Freeland, J., Gundampati, R. K., Manso, R. H., Ruiz, M., Krishnamurthi, V. R., Thallapuram, S. K., Chen, J., & Wang, Y. (2020). Silver ions caused faster diffusive dynamics of Histone-Like Nucleoid-Structuring proteins in live bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, *86*(6). <https://doi.org/10.1128/aem.02479-19>
- Saion**, E., Gharibshahi, E., & Naghavi, K. (2013). Size-Controlled and Optical Properties of Monodispersed Silver Nanoparticles Synthesized by the Radiolytic Reduction Method. *International Journal of Molecular Sciences*, *14*(4), 7880–7896. <https://doi.org/10.3390/ijms14047880>
- Salleh**, A., Naomi, R., Utami, N. D., Mohammad, A. W., Mahmoudi, E., Mustafa, N., & Fauzi, M. B. (2020). The Potential of Silver Nanoparticles for Antiviral and Antibacterial Applications: A Mechanism of Action. *Nanomaterials*, *10*(8), 1566. <https://doi.org/10.3390/nano10081566>
- Samal**, R. R., Gautam, D., Panmei, K., Lanbiliu, P., Saya, L., Gambhir, G., Hooda, S., & Kumar, S. (2022). Evolution in graphene oxide-based materials characterization and modeling. In *Elsevier eBooks* (pp. 210–220). <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-96020-5.00017-0>
- Sánchez Ramírez**, J. F. (2004). Nanopartículas Metálicas: Síntesis, Caracterización y Aplicación en Celdas de Combustible. [Tesis Doctoral]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Posgrado en Ciencias Químicas.
- Saty**, M. Y. H., Abdalla, I., Sarkodie, B., Farooq, A., Elhassan, A., Wang, Y., & Xu, Z. (2024). Recent advances of preparing structure-enhanced conductive yarns to control their performance in potential applications. *Textile Research Journal*. <https://doi.org/10.1177/00405175241253867>

- Seong, M., & Lee, D. G.** (2017). Silver Nanoparticles Against Salmonella Enterica Serotype Typhimurium: Role of Inner Membrane Dysfunction. *Current Microbiology*, 74(6), 661–670. <https://doi.org/10.1007/s00284-017-1235-9>
- Sirgo, M.** (2024, April 8). *Fibras textiles naturales: tipos y propiedades*. Abanderado. <https://www.abanderado.es/blog/fibras-textiles-naturales/>
- Swolana, D., & Wojtyczka, R. D.** (2022). Activity of Silver Nanoparticles against Staphylococcus spp. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(8), 4298. <https://doi.org/10.3390/ijms23084298>
- Tania, I. S., Ali, M., & Azam, M. S.** (2018). In-situ synthesis and characterization of silver nanoparticle decorated cotton knitted fabric for antibacterial activity and improved dyeing performance. *SN Applied Sciences*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0068-x>
- Tarannum, N., Hossain, T. J., Ali, F., Das, T., Dhar, K., & Nafiz, I. H.** (2023). Antioxidant, antimicrobial and emulsification properties of exopolysaccharides from lactic acid bacteria of bovine milk: Insights from biochemical and genomic analysis. *LWT*, 186, 115263. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115263>
- Toshima, N., & Yonezawa, T.** (1998). Bimetallic nanoparticles—novel materials for chemical and physical applications. *New Journal of Chemistry*, 22(11), 1179–1201. <https://doi.org/10.1039/a805753b>
- Varesano, A., & Tonin, C.** (2008). Improving electrical performances of wool textiles: synthesis of conducting polypyrrole on the fiber surface. *Textile Research Journal*, 78(12), 1110–1115. <https://doi.org/10.1177/0040517507077488>

- Vigo**, T. L., & Benjaminson, M. A. (1981). Antibacterial fiber treatments and disinfection1. *Textile Research Journal*, 51(7), 454–465. <https://doi.org/10.1177/004051758105100704>
- Vijayan**, R., Joseph, S., & Mathew, B. (2017). Green Synthesis, Characterization and Applications of Noble Metal Nanoparticles Using Myxopyrum serratum A. W. Hill Leaf Extract. *BioNanoScience*, 8(1), 105–117. <https://doi.org/10.1007/s12668-017-0433-z>
- Virkutyte**, J., & Varma, R. S. (2010). Fabrication and visible light photocatalytic activity of a novel Ag/TiO₂-xNx nanocatalyst. *New Journal of Chemistry*, 34(6), 1094. <https://doi.org/10.1039/c0nj00268b>
- Wakshlak**, R. B., Pedahzur, R., & Avnir, D. (2015). Antibacterial activity of silver-killed bacteria: the “zombies” effect. *Scientific Reports*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/srep09555>
- Wang**, L., Chen, X., Zhan, J., Chai, Y., Yang, C., Xu, L., Zhuang, W., & Jing, B. (2005). Synthesis of gold nano- and microplates in hexagonal liquid crystals. *The Journal of Physical Chemistry B*, 109(8), 3189–3194. <https://doi.org/10.1021/jp0449152>
- Wang**, L., Hu, C., & Shao, L. (2017). The antimicrobial activity of nanoparticles: present situation and prospects for the future. *International Journal of Nanomedicine, Volume 12*, 1227–1249. <https://doi.org/10.2147/ijn.s121956>
- Wang**, X., Yu, J. C., Yip, H. Y., Wu, L., Wong, P. K., & Lai, S. Y. (2005). A Mesoporous Pt/TiO₂ Nanoarchitecture with Catalytic and Photocatalytic Functions. *Chemistry - a European Journal*, 11(10), 2997–3004. <https://doi.org/10.1002/chem.200401248>

- Waseda, Y., Matsubara, E., & Shinoda, K. (2011).** X-Ray Diffraction Crystallography. In *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16635-8>
- Webster, T. J., & Seil, I. (2012).** Antimicrobial applications of nanotechnology: methods and literature. *International Journal of Nanomedicine*, 2767. <https://doi.org/10.2147/ijn.s24805>
- Wen, J., Xu, B., Gao, Y., Li, M., & Fu, H. (2021).** Wearable technologies enable high-performance textile supercapacitors with flexible, breathable and wearable characteristics for future energy storage. *Energy Storage Materials*, 37, 94–122. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.02.002>
- Wu, J., Zhou, D., Looney, M., Waters, P., Wallace, G., & Too, C. (2009).** A molecular template approach to integration of polyaniline into textiles. *Synthetic Metals*, 159(12), 1135–1140. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2009.01.054>
- Xue, C., Jia, S., Chen, H., & Wang, M. (2008).** Superhydrophobic cotton fabrics prepared by sol–gel coating of TiO₂ and surface hydrophobization. *Science and Technology of Advanced Materials*, 9(3), 035001. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/3/035001>
- Ye, W., Leung, M. F., Xin, J., Kwong, T. L., Lee, D. K. L., & Li, P. (2005).** Novel core-shell particles with poly(n-butyl acrylate) cores and chitosan shells as an antibacterial coating for textiles. *Polymer*, 46(23), 10538–10543. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.08.019>
- Yu, C. (2014).** Natural textile fibres. In *Elsevier eBooks* (pp. 29–56). <https://doi.org/10.1016/b978-1-84569-931-4.00002-7>

Zhang, J., Ahmadi, M., Fargas, G., Perinka, N., Reguera, J., Lanceros-Méndez, S., Llanes, L., & Jiménez-Piqué, E. (2022). Silver nanoparticles for conductive inks: from synthesis and ink formulation to their use in printing technologies. *Metals*, *12*(2), 234. <https://doi.org/10.3390/met12020234>

Zhang, X., Liu, Z., Shen, W., & Gurunathan, S. (2016). Silver nanoparticles: synthesis, characterization, properties, applications, and therapeutic approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, *17*(9), 1534. <https://doi.org/10.3390/ijms17091534>