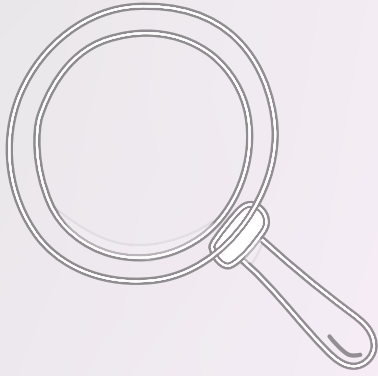


Nanotecnología

antibacterial en textiles



Antibacterial nanotechnology in textiles

Ángela Quiroga-Vergel*

Resumen

ABSTRACT

Las infecciones asociadas a la atención en salud (IAAS) son uno de los principales problemas a los que se tienen que enfrentar las entidades prestadoras de salud. Una de las causas de estas infecciones es la contaminación cruzada que se presenta al utilizar las mismas sábanas, fundas, cortinas o batas para atender a varios pacientes. Por lo que en los últimos años se ha aumentado el uso de textiles antibacteriales en el sector hospitalario; sin embargo, la oferta actual en el mercado tiene falencias en la durabilidad y eficacia del efecto antibacterial. Para mejorar estas características, la nanotecnología ofrece alternativas, que fueron revisadas en la literatura y expuestas en el presente artículo. La metodología utilizada para la vigilancia tecnológica inició realizando una búsqueda general sobre textiles antibacteriales, luego se enfocó en una de las principales técnicas para la fabricación de nanofibras, en seguida se enlistaron los agentes antimicrobianos más importantes, las pruebas con las que se verifica su eficacia y se profundizó la búsqueda en dos agentes antimicrobianos, uno inorgánico (nanopartículas de plata) y otro orgánico (quitosano). La búsqueda finalizó con una revisión de textiles antibacteriales en Colombia y las perspectivas futuras.

Palabras clave:

Antibacteriales, AgNp, Electrospinning, Nanofibras, Nanotecnología, Quitosano.

Infections associated with health care (IAAS) are one of the main problems facing healthcare providers. One of the causes of these infections is the cross-contamination that occurs when using the same sheets, covers, curtains, or gowns to care for several patients. Therefore, in recent years the use of antibacterial textiles in the hospital sector has increased; however, the current offer on the market has shortcomings in the durability and efficacy of the antibacterial effect. To improve these characteristics, nanotechnology offers alternatives, which were reviewed in the literature and presented in this article. The methodology used for technological surveillance began by conducting a general search on antibacterial textiles, then focused on one of the main techniques for the manufacture of nanofibers, then the most important antimicrobial agents were listed, as well as the tests with which their effectiveness is verified. and the search was deepened in two antimicrobial agents, one inorganic (silver nanoparticles) and the other organic (chitosan). The search ended with a review of antibacterial textiles in Colombia and prospects.

Keywords:

Antibacterial, AgNp, Electrospinning, Nanofibers, Nanotechnology, Chitosan.

Introducción

La búsqueda del ser humano por obtener textiles antibacteriales se remonta a la edad antigua, por ejemplo, los egipcios funcionalizaban los textiles con especias y hierbas para envolver las momias, evitando así que las bacterias y hongos descompusieran el cuerpo. Otro ejemplo, es la cultura China, donde se utilizan fibras de bambú, las cuales contienen un compuesto antimicrobiano, para aumentar la durabilidad de la estructura de viviendas. Sin embargo, no solo en la época antigua se generaron estas búsquedas por conseguir textiles antibacteriales, en la segunda guerra mundial, las telas militares se trataron con sales de antimonio, cobre y una mezcla de ceras coloradas, para que aumentara su actividad antimicrobiana, disminuyera la probabilidad de pudrirse por lluvias y nieve y aumentara su durabilidad. Actualmente la modificación superficial de textiles incluye técnicas como electrospinning, nanotecnología, tratamiento plasma, polimerización, microencapsulación y técnicas sol-gel. En el artículo de revisión de textiles antimicrobianos, (Gulati et al., 2021) se indican algunos de los principales sectores de la industria donde los textiles con estas propiedades son de interés:

- Prendas de vestir: gorras, chaquetas, toallas sanitarias, ropa deportiva, ropa interior, ropa de invierno.
- Comercial: alfombras, revestimiento de asientos, lonas, vehículos, etc.; paños para quitar el polvo, tela militar, tienda de campaña, uniformes.
- Cuidado de la salud: vendas, auriculares, exfoliantes, máscaras, batas de laboratorio, kits de protección.
- Hogares: ropa de cama, alfombra, cobertor, cortinas, trapeador, almohadas, toallas.

Particularmente, en el área de la salud, se utiliza de manera cotidiana un alto número de textiles antibacteriales para prevenir y disminuir las infecciones asociadas a la atención en salud (IAAS), por lo que la investigación en tecnologías que permitan la mejora de estos textiles es de suma importancia. Un gran número de estudios se enfoca en impregnar textiles con agentes antimicrobianos, como lo mencionan (Schneider et al., 2021) en su artículo, en el cual se analizan diferentes autores quienes comentan que las sustancias más utilizadas

son las nanopartículas de plata y los óxidos de cobre; por ejemplo, en uno de ellos, se utilizó un tejido de poli algodón (compuesto por poliéster y algodón) impregnado con nanopartículas de plata, donde se obtuvieron resultados positivos en un 99% con virus (SARS-CoV-2 sobre la superficie textil) en tan solo dos minutos.

Recientemente, la pandemia por el Covid-19, fue sin duda un episodio que llevó a los investigadores en muchas áreas a fijar sus esfuerzos en detener o contrarrestar el virus. Algunas investigaciones fueron realizadas en torno a textiles antimicrobianos, como lo muestra el artículo de revisión (Mallakpour et al., 2021). Allí se referencian estudios con efecto antibacterial, antifúngica y antiviral, a partir de un textil de algodón y poliuretano modificado con éster-base benzofenona cuaternaria y amina; así como recubrimientos de nano clúster de plata y sílice, para depositarlos sobre filtros de algodón, vidrio y metálicos, mostrando un buen desempeño antiviral. Otro de los ejemplos, es el uso de ácido tánico en la funcionalización de telas filtrantes de polipropileno, con las que se logra una alta capacidad de captura de virus, en comparación al no funcionalizado. También, se mencionan textiles respetuosos con el ambiente, como uno obtenido con celulosa funcionalizada con nanopartículas de plata, el cual mostró resultados favorables para bacterias grampositiva y gramnegativas.

Por lo anterior, dotar a los textiles de propiedades antimicrobianas ha sido y será de gran importancia para la humanidad. Esto ha llevado a que se realicen investigaciones en el área de nanotecnología, para ofrecer propiedades antibacteriales más efectivas y duraderas a los textiles (Petrova et al., 2021). Se inició con la impregnación en la superficie de sustancias como dióxido de titanio, cobre, sales de plata y de amonio cuaternario que requerían el uso de grandes cantidades de solventes, muchos de ellos perjudiciales para el ambiente, con actividad antibacteriana muy limitada en el tiempo y alteración en la textura de los tejidos. De manera más reciente se ha utilizado la combinación de materiales que en ocasiones requieren grandes proporciones en la mezcla lo cual disminuye su capacidad de ser cargados con agentes antimicrobianos (por ejemplo, fibras de cáñamo y metálicas). Así, la funcionalización de textiles para aportar propiedades antibacterianas requiere no sólo la búsqueda de técnicas eco amigables sino económicamente viables, que optimicen la carga de agentes antimicrobianos y sean altamente reproducibles (Qiu et al., 2020). Asimismo, en el artículo de Idumah (2021), se resumen las aplicaciones de la nanotecnología en el área textil, especificando como una de ellas la obtención de

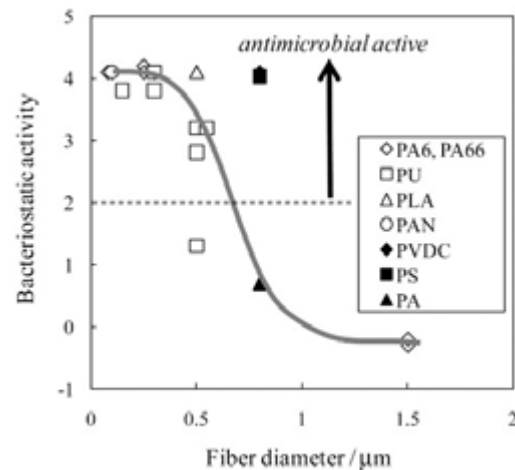
textiles antivirales y antibacteriales. En este se indica que diversas nanopartículas, de TiO₂, ZnO, CuO y plata, pueden favorecer comportamientos antibacteriales y antifúngicos en textiles. Idumaha un ejemplo de textiles impregnado con nanopartículas de CuO, como sabanas, ropa de personal, batas, pañales, pijamas, entre otros. Esta modificación a los textiles es capaz de reducción de la carga biológica y disminuye el riesgo de infecciones asociadas a la atención en salud.

Por otro lado, se debe considerar que el aumento de la población de los últimos años ha facilitado la hacinación y bajos niveles de higiene en algunas poblaciones con alta densidad poblacional, llevando al aumento de enfermedades de origen microbiana. Para la salud pública es muy importante reducir estas infecciones bacterianas y la propagación de patógenos. Los cuales son transmitidos por artículos de consumo humano como lo son el agua potable, los alimentos, los artículos de cuidado personal y los textiles. El reducir estos patógenos o su transmisión llevaría a un ahorro en el presupuesto de salud de los gobiernos y disminuiría las afectaciones en la población. Como comentan Huang y colegas (2020) los nanomateriales cuentan con unas propiedades químicas y físicas únicas, que pueden permitir el desarrollo de productos antibacteriales, como por ejemplo nanomateriales basados en ZnO, CuO y Ag, los cuales son tóxicos para microorganismos y pueden inhibir su proliferación. Así mismo, Huang nos indica que es importante considerar que a pesar de las ventajas que presentan estos compuestos, también pueden ser tóxicos para organismos no objetivo como bacterias, hongos y algas, que se encuentren, por ejemplo, en cuerpos de agua y sean un punto final de deposición de residuos de lavado o filtrado con esos nanomateriales. Lo anterior también lo confirman Gulati y colaboradores (2021) en su artículo de revisión, ya que indican que de las nanopartículas metálicas no se conoce aún el impacto ambiental que puedan generar. Por lo tanto, se tiene el reto de establecer un sistema para disposición de estos textiles.

Una de las alternativas para la reducción del impacto ambiental, la liberación controlada de biocidas y la generación de antibacteriales más duraderos, es la fabricación de nanofibras. Estas son nanomateriales de una dimensión, entre 1 y 100 nanómetros. Una de las técnicas para la fabricación de estas nanofibras es el electrospinning, la que se trabajó por primera vez en 1600 por Gilbert y no fue sino hasta 1845 que se continuó la

investigación en métodos de hilado por Schwabe (Barhoum et al., 2019). En el artículo de Matsumoto y Tanioka (2011), se referencia un estudio de la aplicación de nanofibras de quitosano, en la cual comparan 2 membranas de microfibras comerciales (una de PET y otra de quitosano) con una membrana de nanofibras de quitosano, la que presenta un efecto antibacterial más efectivo, esto debido a la alta área superficial. En este artículo, también es presentada una gráfica que presenta la estrecha relación entre el diámetro de fibra de membranas y su actividad antimicrobiana, mostrando que membranas de fibras con tamaño menos a 800nm muestran una mejor actividad antimicrobiana (Figura 1).

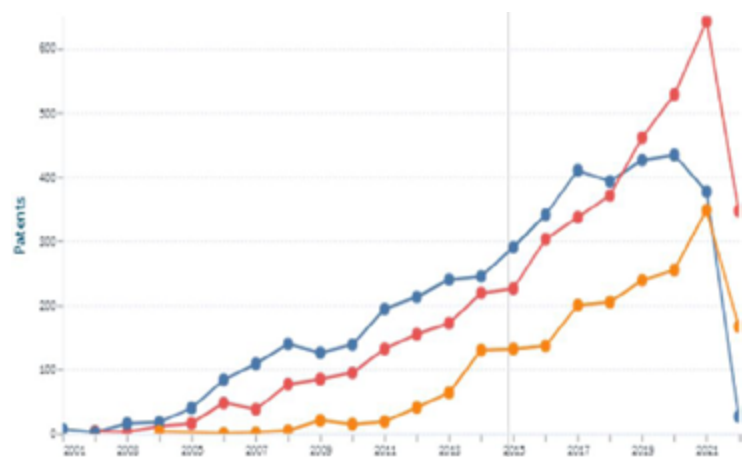
Figura 1.
Relación entre el diámetro de fibra y su actividad antibacterial.



Nota. Gráfica tomada de (Matsumoto & Tanioka, 2011)

El estudio de nanofibras se ha ido incrementando en los últimos años, según indica The Lens - Free & Open Patent and Scholarly Search (2022), ya que el número de patentes publicadas en 2021 fue superior a 600 y a mostrado un crecimiento considerable desde 2001, como se muestra en la Figura 2.

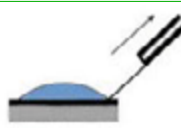
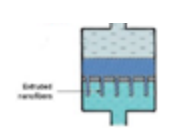
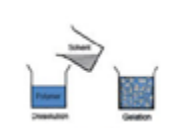
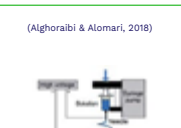
Figura 2.
Número de patentes publicadas en últimos años, sobre nanofibras antibacteriales.



Nota. Gráfica generada en (The Lens - Free & Open Patent and Scholarly Search, 2022)

Para la fabricación de nanofibras, los principales métodos de fabricación reportados en la literatura son los siguientes:

Tabla 1
Métodos de fabricación de nanofibras

MÉTODO DE FABRICACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	DIBUJO
Drawing: Gota de solución de polímero con una punta afilada y dibujarlo como una fibra líquida que luego se solidifica por rápida evaporación del solvente debido a la alta área superficial.	-Montaje experimental sencillo y requisitos mínimos. -Conveniencia del proceso	-Proceso discontinuo -Dificultad con el control del tamaño de fibra	 (Alghorai & Alomari, 2018)
Template synthesis: produce nanofibras al pasar una solución de polímero a través de los poros de diámetro a nanoescala bajo la aplicación de presión de agua.	-Control simple del diámetro de las fibras.	-El proceso no se puede escalar	 (Alghorai & Alomari, 2018)
Phase separation: las fases se separarán debido a la incompatibilidad física. La fase del solvente luego se extrae de la solución mientras que la otra fase permanece.	-Pocos requisitos -Se puede producir matriz de nanofibras	-Pocos requisitos -Aplicable solo a polímeros particulares.	 (Alghorai & Alomari, 2018)
Self-assembly: las moléculas se organizan y organizan en patrones o estructuras a través de fuerzas no covalentes tales como enlaces de hidrógeno, fuerzas hidrofóbicas y reacciones electrostáticas.	-Conveniente para producir fibras ultrafinas	-Complejidad del proceso -Problema con el control del tamaño de la fibra en el proceso.	 (Alghorai & Alomari, 2018)
Electrospinning	-Es completamente escalable -Económico -Excelente repetibilidad y conveniencia -Pueden obtenerse fibras continuas y uniformes -Control simple de diámetro de la fibra.	-Inestabilidad del chorro	 (Alghorai & Alomari, 2018)

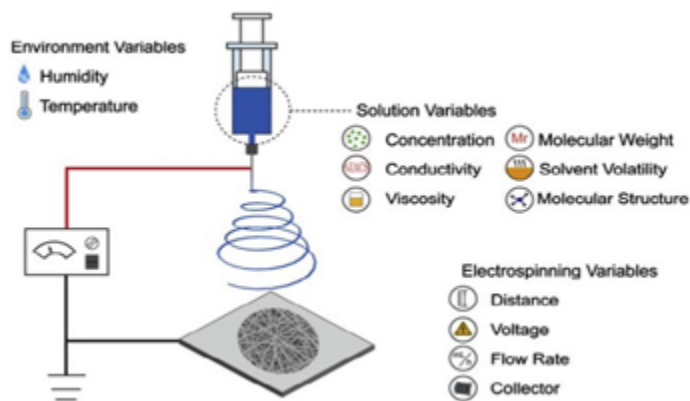
Nota. Tomado de: (Maliszewska & Czapka, 2022) (Mirjalili & Zohoori, 2016)

Electrospinning

A partir de la revisión bibliográfica y como se presenta en la Tabla 1, el electrospinning es una de las técnicas más comúnmente utilizadas para obtener nanofibras. En esta, una o varias soluciones poliméricas son cargadas a una bomba que empuja el embolo de una jeringa hasta la aguja, en la cual se aplica un alto voltaje, dando como resultado un chorro que sale de la punta de la aguja, este forma lo que se denomina un cono de Taylor que luego, prolongan el chorro hasta que se forman fibras en tamaño micro o nanométrico. La formación de fibras delgadas y continuas depende de la correcta combinación de todas las variables de la técnica, las cuales fueron analizadas por los autores Brown y Stevens (2007), Williams y colaboradores (2018) y Zaikov (2017) y son resumidas a continuación:

- **Peso molecular del polímero:** si este es muy bajo, la técnica formará esferas, pero si este valor es muy alto, las fibras se formarán en escala micrométrica.
- **Tensión superficial:** al reducir esta propiedad, las esferas que se forman pueden convertirse en fibras lisas.
- **Conductividad:** al aumentar esta propiedad en la solución, el chorro se carga más y forma fibras más delgadas.
- **Potencial eléctrico:** si se utiliza un valor bajo, es posible que no forme fibras y por el contrario al aumentar el voltaje, permite la formación de fibras más delgadas.
- **Flujo:** si este es bajo, da suficiente tiempo para la polarización, si es alto producirá fibras gruesas con burbujas.

Figura 3.
Dibujo conceptual de la técnica electrospinning.



Nota. Ilustración tomada de (Ding et al., 2018)

- **Concentración:** una mayor viscosidad en la solución de trabajo refleja una mayor concentración de la solución, lo cual formará microfibras en forma de hélice. A medida que baja la concentración se formarán perlas con nanofibras y a baja concentración se obtienen nanopartículas.
- **Distancia entre aguja y colector:** si es muy corta no forma fibras y disminuye el tiempo de evaporación del solvente, al ser más alta no forma fibras uniformes.
- **Parámetros ambientales (temperatura y humedad):** a una baja humedad el solvente se va a evaporar a mayor velocidad, a alta humedad el diámetro de las fibras es mayor.

Para conocer un poco más de la técnica electrospinning, sus componentes y como se ve un equipo de laboratorio, puede revisar este video en YouTube realizado por la Universidad de Sevilla (2021), el cual indica claramente estos aspectos:

Una las principales ventajas de esta técnica, es que permite obtener fibras mezcladas con compuestos que puedan darle otro tipo de propiedades al textil. Por ejemplo, Jia y colaboradores (2019) con el objetivo de mejorar las propiedades de la celulosa y crear nanofibras con propiedades antibacteriales,

Figura 4.
Video educativo en español sobre proceso de electrospinning.



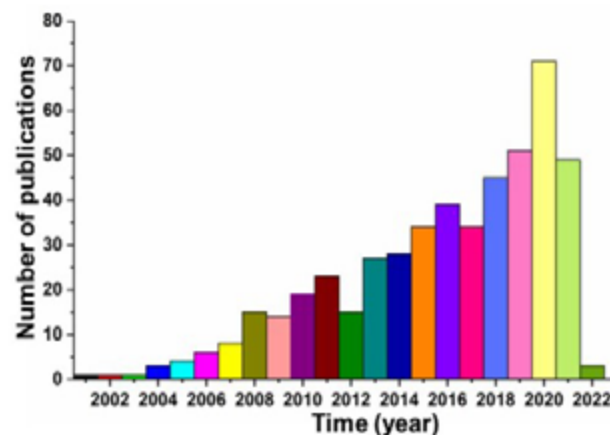
Nota. Video de Plataforma Youtube (Universidad de Sevilla, 2021)

utilizaron la técnica electrospinning para la fabricación de nanofibras con TiO_2 y óxido de grafeno. En la preparación de la solución, utilizaron una mezcla 2:1 de acetona y DMF, a esta agregaron 8% peso de acetato de celulosa, 0.8% en peso de TiO_2 y 0.8% en peso de láminas de óxido de grafeno. Las condiciones de electrospinning fueron 20kV, 20 cm entre la boquilla y el colector y 0.75ml/h de caudal. Obteniendo fibras entre 600-1000nm y una mejora en el rendimiento antibacteriano e hidrofobicidad.

Hilos de nano fibras

Una de las modificaciones que puede realizarse a la técnica de electrospinning, permite obtener hilos a partir de nanofibras y luego con estos realizar tejidos. En una búsqueda realizada por Wu y colegas (2022) con las palabras clave “electrospinning and yarn” se visualiza la tendencia creciente en el número de investigaciones en estos temas, mostrando un interés por parte de la academia en la investigación de hilos con nanofibras.

Figura 5.
Número de publicaciones anuales sobre hilos y electrospinning.

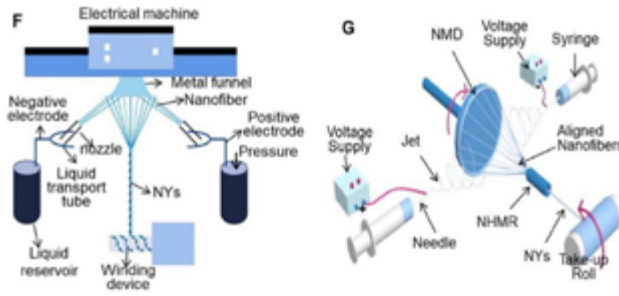


Nota. Generado en Web of Sciences

Las aplicaciones que pueden tener este tipo de hilos son muy diversas, sin embargo Wu y colaboradores (2022) resaltan el importante impacto que este tipo de hilos tendría en el área de biotextiles, como scaffolds e implantes para ingeniería de tejidos de tendón, hueso, corazón, vasos sanguíneos y nervios; así como bioelectrónicos como máscaras faciales, actuadores, generadores de energía, sensores y capacitores. En la revisión realizada por Wu, se hace un compilado de las principales técnicas para la obtención de hilos de forma discontinua y continua, a partir de electrospinning. Debido a que el enfoque continuo puede ser de mayor aplicación para la industria textil, se trae a este artículo dos de los esquemas más fáciles de adaptar, de la recopilación presentada por Wu y colaboradores sobre los esquemas continuos.

Figura 6.

Esquema de dispositivos de electrospinning para la fabricación de hilos con nano fibras de manera continua

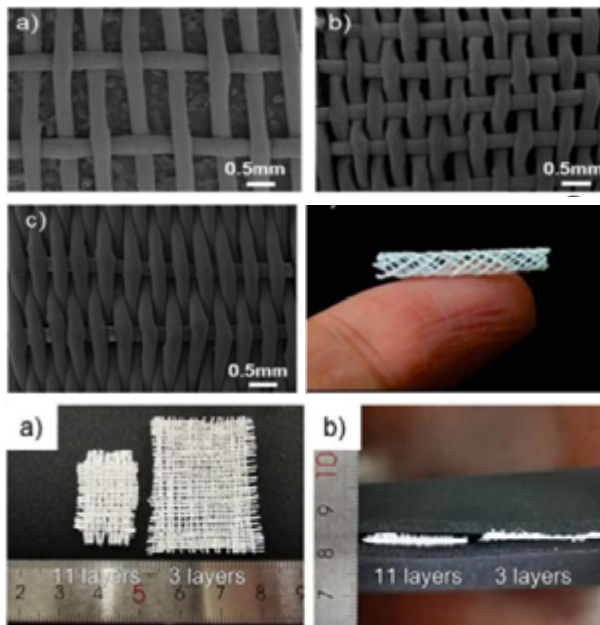


Nota. (F) Aparato conjugado múltiple modificado. (G) Dispositivo fabricado mediante la introducción de un colector innovador construido con NMD y NHMR. Tomado de: (Wu et al., 2022).

Algunos de los materiales con los que se han obtenido hilos con nanofibras son PAN, PCL, PLLA, PLGA, PVDF-TRFE, PVDS-HFP, PA66, PSA y DOPP, a los cuales se les han tomado medidas de resistencia a la tensión y elongación. En el artículo de Wu y colegas (2022) se muestran también algunas técnicas para la generación de textiles con estos hilos de nanofibras y muestran algunos de los resultados que han obtenido los investigadores:

Figura 7.

Ejemplo de textiles fabricados con hilos a base de nanofibras.



Nota. Imágenes tomadas de (Wu et al., 2022)

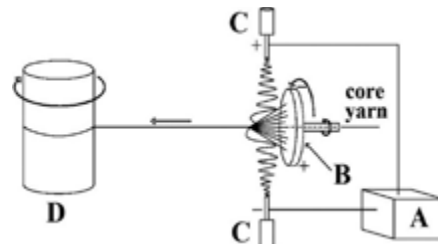
En el artículo publicado por Levitt y colegas (2017), se muestra esta modificación al equipo tradicional de electrospinning, para la producción de hilos con nanofibras de PVDF-TrFe, PAN y PCL. En este caso, se optó por una configuración con 2 fuentes de alto voltaje (10-12kV), dos bombas de jeringa con un flujo de 1ml/h, un embudo de cobre de diámetro 120mm, agujas de calibre 21. Especialmente, las jeringas se colocaron

simétricamente al embudo con una distancia de 5-6cm entre la punta y el colector, así como un ángulo de 30° entre la aguja y el embudo. Una de las agujas fue cargada positivamente y la otra negativamente. El embudo fue conectado a tierra y se variaron las velocidades de rotación de este entre 500-1100 rpm.

En el artículo publicado por la revista de ingeniería de polímeros y ciencia por Dabirian y colaboradores (2012), los autores presentan una configuración del equipo electrospinning para el recubrimiento continuo de hilos con nano fibras, así como se muestra en la siguiente imagen:

Figura 8.

Esquema de equipo para el recubrimiento de hilos con nanofibras.

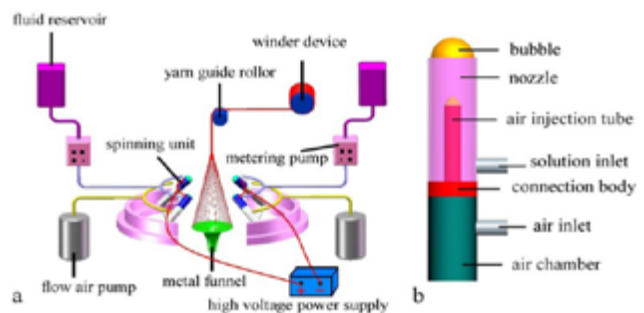


Nota. A) Fuente de alto voltage DC, B) Plato Twister, C) Bomba de aguja y D) Unidad de embobinado. Tomado de: (Dabirian et al., 2012)

Otras configuraciones más complejas se han utilizado para la producción de hilos con ayuda de boquillas de aire y en combinación con electrospinning, así como se muestra en el siguiente esquema:

Figura 9.

Esquema del equipo para la formación de hilos de nanofibras con boquilla de aire en combinación con electrospinning.



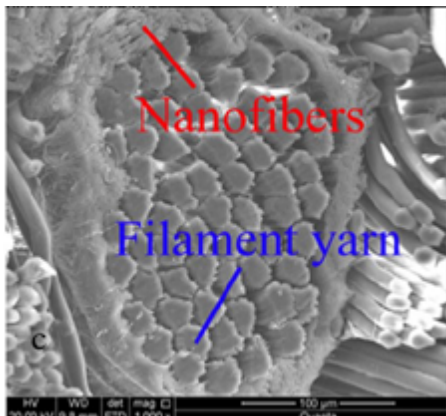
Nota. Tomado de: (He et al., 2014)

Los investigadores después de obtener el hilo de nano fibras realizan un recubrimiento a un hilo comercial por torsión, luego al realizar un corte transversal obtienen una imagen SEM donde se confirma que el hilo quedó recubierto (fig. 10).

En el artículo publicado en la Journal of Colloid and Interface Science, se muestran los resultados de una investigación donde utilizan óxido de grafeno y nanopartículas de plata embebidas en nano fibras de poliácrylonitrile (PAN), en el que

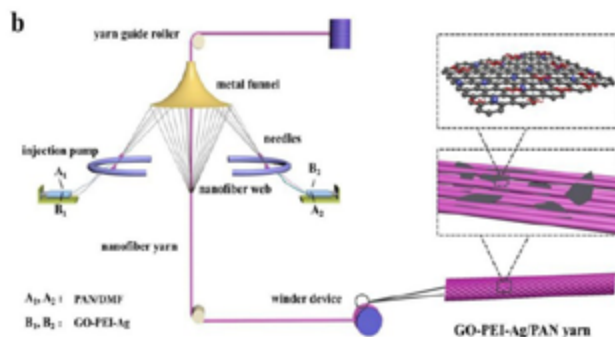
obtienen un hilo con propiedades antibacteriales durables (Yu et al., 2021). La técnica utilizada por Yu se presenta en la figura 11:

Figura 10.
Microscopía SEM de sección transversal de hilo.



Nota. Tomado de: (He et al., 2014)

Figura 11.
Esquema de obtención de hilos recubiertos con nanofibras de PAN funcionalizadas



Nota. Tomado de: (Yu et al., 2021)

Dentro de lo encontrado, se observa que el textil que fue funcionalizado con óxido de grafeno – polietilenimina (PEI) – nanopartículas de Ag, tiene una actividad antibacterial de 99,99% contra E. Coli y S. Aureus y mantiene este valor incluso después de 10 lavadas.

Adicionalmente a la formación de hilos o recubrimiento de hilos con nanofibras, algunos investigadores han buscado la manera de integrar más de cerca las nanofibras con las fibras de algodón, de manera que queden inmersas unas con las otras. Por ejemplo Qiu y colegas (2020), realizaron una modificación al equipo de electrospinning en el laboratorio, para depositar nanofibras de PAN cargadas con triclosán, sobre malla de fibras de algodón, para luego ser hiladas. Después de realizar los estudios antimicrobianos, encontraron una mejora en la durabilidad de la actividad antibacterial, con más de 95% a los 35 ciclos de lavado.

Otro estudio para la fabricación de hilos híbridos con propiedades antibacteriales fue publicado por

Jiang y colaboradores (2017), quienes utilizando un sistema de electrospinning modificado, en el cual iban realizando la deposición de nanofibras de PAN cargadas con triclosán (flujo 3ml/min) a una red de cardado que fue desplazándose a 30m/min. Luego la red de cardado se estiró, se torció y se alimentó a la máquina para hilar, con el hilo obtenido se fabricó un tejido de punto liso con máquina circular. Por esta técnica anteriormente descrita, los autores lograron que las nanofibras quedaran inmersas en las fibras de algodón y al realizar las pruebas antimicrobianas, se observaron excelentes resultados con las fibras híbridas.

Agentes antimicrobianos

Muchos agentes antimicrobianos han sido utilizados en la fabricación de textiles y membranas para curar y prevenir enfermedades de salud pública. Del grupo de materiales metálicos e inorgánicos los más comunes son plata, cobre, zinc, dióxido de titanio. Y agentes orgánicos como amonio cuaternario y compuestos catiónicos y agentes biológicos como hinokitiol, quitosano y antibióticos (Matsumoto & Tanioka, 2011)

En el artículo de revisión por Gulati y colegas (2021), el capítulo del libro publicado por Ibrahim (2015) y el artículo publicado por Muñoz (2019) menciona los siguientes agentes:

Nanopartículas:

- Plata (AgNPs): Fuerte toxicidad frente a microbios, poca toxicidad hacia células humanas, buena durabilidad y capacidad de teñido. (<10nm en tamaño) han demostrado actividad antibacterial contra COVID-19.
- CuONp : Contra bacterias gram-positivas y gram-negativas.
- NP Se: contra Bacillus subtilis
- Np Silice + quitosano: contra hongos (agricultura verde)
- ZnO NPs: en textil de algodón, gram-positiva y gram-negativa.
- TiO2 NP, en textil de algodón, método sol-gel, contra S. aureus y E.Coli

Componentes sintéticos:

- QACs (Compuestos de amonio cuaternario): surfactante catiónico, efectivo contra gram-positivas, gram-negativas, hongos y cierto grupo de virus.
- PHMB: Alta actividad microbicida, baja toxicidad.

- N-halaminas: en el mecanismo de acción libera iones Cl^+ al agua.
- Triclosan: compuesto fnólico, inhine la síntesis de lípidos, afectando el crecimiento de bacterias, levaduras y mohos.

Componentes naturales:

- Lignina: buena resistencia contra ataques microbianos en plantas. Utilizado contra *Staphylococcus epidermidis*.
- Quitosano: *S aureus*, *E.Coli* y *Listeria monocytogenes*.

Para poder realizar nanofibras antibacteriales con varios de estos agentes, los investigadores han optado por incorporar el biocida en las fibras. Según lo revisado por Gao y colaboradores (2014), esto se puede lograr con los siguientes procesos: mezclando uniformemente el agente activo a la solución de polímero, a través de electrospinning coaxial (con una aguja dentro de otra, alineadas, para la formar estructuras de coraza y centro), encapsulando el agente activo en nanopartículas que podrían ser dispersadas en la solución, postratamiento o con la unión del agente activo a la superficie de la fibra. Particularmente para el primer método, el mezclado, se prefieren soluciones coloidales de AgNp para combinarlas con las soluciones, ya que en polvo se pueden agregar más fácilmente. También se indica que las AgNo con compatibles con muchos solventes como agua, ácido fórmico, entre otros, y se ha agregado en un rango de 0.5-5% con respecto a la masa del polímero, incluso comenta que la adición de estas nanopartículas coloidales puede amentar la conductividad de las soluciones y generar diámetros de fibras más pequeños. Otra opción que los autores comentan es la síntesis de nanopartículas en la solución del polímero, siendo esta una opción bastante atractiva ya que permite obtener una dispersión uniforme debido a la estabilización que permite el polímero. En el caso de este tipo de síntesis el agente reductor puede ser el solvente como dimetilformamida (DMF). el cual puede tener una velocidad de reacción baja, pero con la ventaja de poder realizarse a temperatura ambiente; asimismo se pueden utilizar otros agentes reductores como ácido fórmico o polímeros como carbometilquitosano.

Pruebas de calidad en textiles antibacteriales

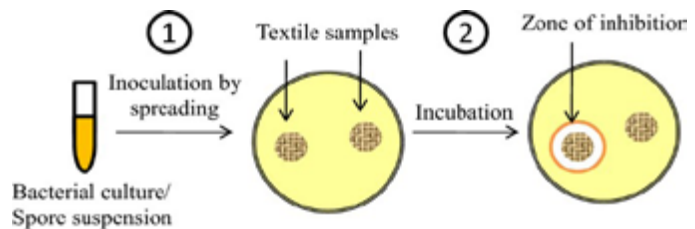
Existen varios tipos de métodos para la verificación de la eficacia antibacteriana de un

textil, según comenta Gao y colegas (2014), se pueden clasificar en tres categorías:

- Pruebas de difusión en agar (métodos AATCC 147-2004, JIS L 1902-2002 y SN 195920-1992): son pruebas semi cualitativas, donde muestras de textil en forma circular o cuadrada, se colocan sobre el agar antes de la incubación. Luego estas se dejan a 37°C por 18 a 24h, de esta manera el agente biocida se difundirá alrededor, inhibiendo el crecimiento de las bacterias, siendo un indicativo del nivel de actividad antibacteriana que tanta zona de inhibición se general. . Así como se muestra en la siguiente figura:

Figura 12.

Representación gráfica de la prueba crecimiento bacteriano sobre textil.

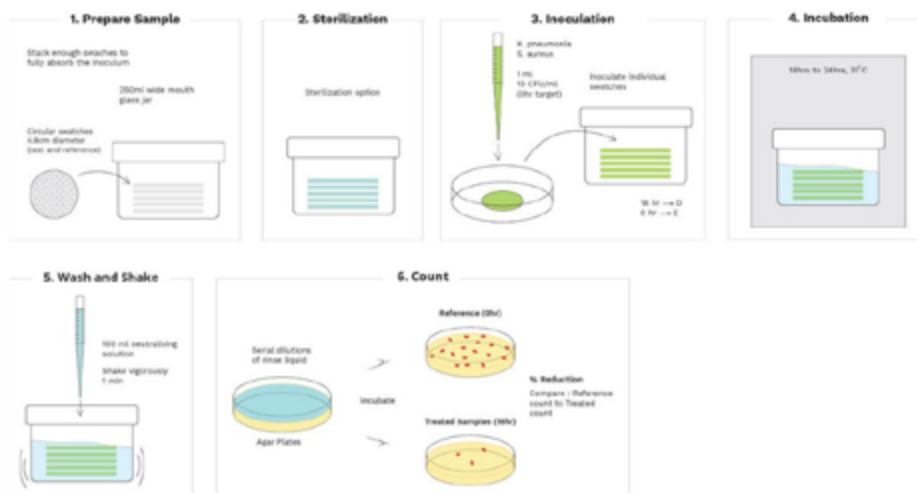


Nota. Tomado de: (Gulati et al., 2021).

- Es importante tener en cuenta que para esta metodología el agente antimicrobiano debe difundirse en el agar, si no lo hace, como en el caso del quitosano, no se debe esperar una zona de inhibición.
- Pruebas de contacto dinámico (ASTM E2149): en esta prueba la muestra de textil se sumerge en una solución bacteriana diluida y se agita durante cierto periodo de tiempo. Luego en tiempos específicos se toma un pequeño volumen de la suspensión y se determinan las concentraciones bacterianas. Este método permite examinar la actividad antibacteriana de agentes antibacteriales que se liberen en el medio, como los que no.
- Pruebas de contacto íntimo (AATCC100): en este método 1ml de suspensión de microorganismo 1000000CFU/ml se inocular en muestra tanto tratada como no tratada. Luego de un tiempo específico se extraen los microorganismos con un neutralizador diluido y en placas, y a continuación se realiza el conteo, evaluando así la inhibición a la multiplicación como la eliminación de bacterias.

Figura 13.

Representación gráfica del método AATCC 100 para la evaluación de textiles antibacteriales.



Nota. Tomado de: («AATCC 100 - Antimicrobial Fabric Testing - Microbe Investigations», s. f.)

Para todos los ensayos se recomienda utilizar una especie bacteriana Gram positiva como *Staphylococcus aureus* y una Gram negativa como *Klebsiella pneumoniae* o *Escherichia coli*. Recordando que las bacterias Gram positivas (tinción violeta) son las que cuentan con una pared gruesa, y presencia de ácidos lipoteicoicos y teicococ en la pared celular, a diferencia de las Gram negativas (tinción roja) que no tienen estas características y además cuentan con polisacáridos en la pared celular. Esta tinción particular de cada grupo, permite al personal médico realizar un mejor diagnóstico de las infecciones, tratar con los antibióticos adecuados y en algunos casos mostrar la necesidad de atención médica urgente (Rodríguez, 2018). Usualmente las infecciones más graves son causadas por las bacterias Gram negativas.

A pesar de que los métodos de estudio antibacterial en textiles están estandarizados por las normas previamente mencionadas, algunos de los estándares tienen ventajas. (Pinho et al., 2011) realizan una comparativa entre las normas, encontrando que el método de adsorción JIS L 1902 es el más preciso, que las pruebas cuantitativas (AATCC 100 y el método de absorción JIS L 1902) son más precisas y confiables que las cualitativas y que aunque los métodos cualitativos (AATCC 147 o los métodos JIS L 1902-Halo) no fueron los más rentables, son útiles para un gran número de muestras.

Biofilm

Muchas veces la contaminación bacteriana en las superficies de hospitales, industria alimentaria o sistemas de distribución de agua se presenta en forma de biopelículas. Estas son poblaciones de microorganismos

concentradas en una interfaz sólido-líquido y que está encerrada por sustancias exopoliméricas que permiten la comunicación con el exterior y protege las bacterias dentro de ellas, esta protección hace más difícil la descontaminación de estos microorganismos (Kovalova et al., 2016). Para la medición de la posibilidad de reducción de formación de biofilm en textiles, la muestra de tela se incubaba durante la noche en medio de caldo inoculado con la cepa bacteriana de prueba. Después de enjuagar con agua esterilizada después de la incubación, la biopelícula visual se puede observar utilizando microscopia. Sin embargo, el ensayo estático de biopelículas que utiliza la tinción de cristal violeta es el método más convencional para la determinación de la actividad anti biopelícula de las nanopartículas (Gulati et al., 2021). También se puede hacer visualización del biofilm con microscopia de fluorescencia, con 0.02% de tinción calco flúor, la cual permite identificar la presencia de exopolisacáridos (Clavijo-Grimaldo Dianney et al., 2019)

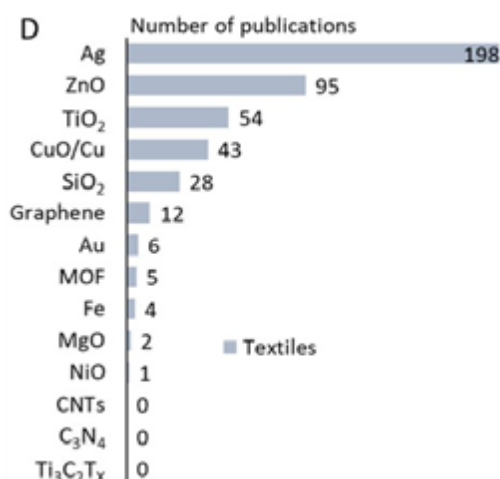
AgNps

El mecanismo de acción de las nanopartículas de plata (AgNps) se basa en la reacción con sustratos proteicos, afectando negativamente el funcionamiento celular, la respiración e inhibe el metabolismo basal que implica el transporte de electrones y la movilidad de sustratos en la membrana celular (Idumah, 2021). Este mecanismo lo aclaran mucho mejor Yetisen y colegas (2016), indicando que las nanopartículas en estado metálico son inertes, pero cuando entran en contacto con humedad se liberan iones Ag^+ que son reactivos y se difunden a través de la pared celular, a continuación los iones

se unen a las proteínas que contienen azufre, para cambiar estructuralmente la pared celular.

En el artículo de revisión de Huang y colaboradores (2020), se realiza una búsqueda en la plataforma Web of Science, en la que se analiza cual agente antibacteriano ha sido el de mayor interés por las publicaciones presentadas, según el tipo de aplicación. En la categoría textil, se encuentra un mayor número de publicaciones en nanopartículas de plata, en segundo lugar, de óxido de zinc y tercer lugar óxido de titanio, como se muestra en la Figura 14.

Figura 14.
Número de publicaciones entre 2015-2020 de cada agente antimicrobiano utilizado en textiles antibacteriales.



Nota. Tomado de: (Huang et al., 2020)

Es de resaltar que el óxido de zinc ha adquirido alta importancia en el estudio de textiles, pues es un mineral esencial con bajo potencial de toxicidad humana.

En el artículo de revisión de Huang (2020) también se presenta una tabla resumen de 10 estudios de investigación de textiles impregnados con nanomateriales, dentro de los cuales se destaca que la mayoría usa mecanismo de liberación de iones metálicos. Así mismo, ellos llegan a la conclusión de que los tratamientos con nanotecnología son eficaces y sostenible para una amplia gama de fibras sintéticas y naturales. Las técnicas más utilizadas para la aplicación de estas modificaciones al textil son los métodos pad-dry-cure, el proceso de inmersión en agua, recubrimiento asistido por microondas, síntesis in situ, fibras de recubrimiento con hidrogeles y síntesis directa de las nanopartículas sobre las fibras.

Un ejemplo de síntesis in situ de partículas de plata sobre fibras de algodón, lo investigó (Shateri Khalil-Abad & Yazdanshenas, 2010). El proceso consistió en la disolución de nitrato de plata (0.04M) a una solución madre de goma arábiga, a la cual fueron

agregados dos gramos de algodón tratado con KOH, luego se adicionó una solución de ácido ascórbico (0.2M) que también contenía goma arábiga, la solución se agitó vigorosamente a 1100 rpm. Después de agitación por 24h a temperatura ambiente, el algodón se retiró, se limpió con etanol y fue secado a temperatura ambiente. Posteriormente, también algunas muestras fueron modificadas superficialmente con OTES. El tejido obtenido presentó propiedades súper hidrofobas y después de las pruebas antibacteriales, el textil mostró zonas de inhibición para bacterias grampositivas y gramnegativas.

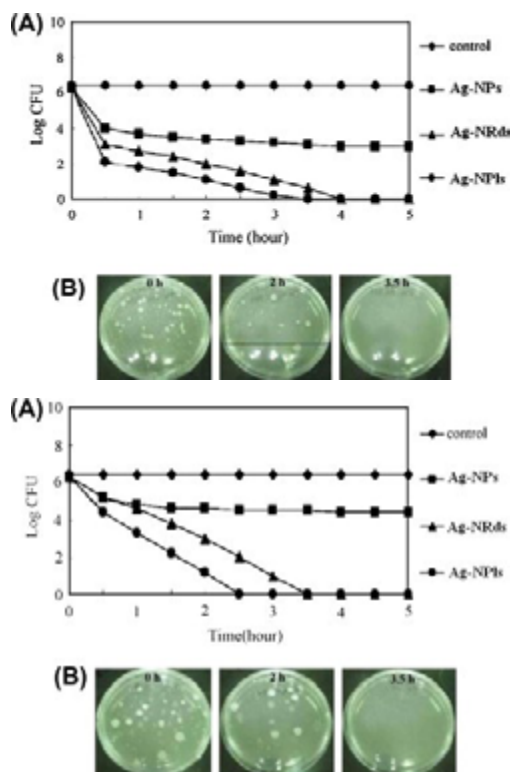
A pesar de todas las ventajas que puedan traer las nanopartículas metálicas como agentes antimicrobianos, varios investigadores en los últimos años han presentado su preocupación por el impacto de estos a los organismos no objetivo. En el artículo presentado por Huang y colegas (2020) se habla de este tema, comentando que una investigación realizada en 2013 indicaría que para la misma concentración a la que fueron tóxicas las nanopartículas de ZnO, CuO y Ag para los microorganismos objetivos, fueron también tóxicas para otros organismos acuáticos como bacterias, hongos y algas. Este es un factor de sostenibilidad que no debe ignorarse, ya que, al agregar este tipo de partículas a los textiles, estas deben fijarse muy bien al sustrato, para evitar su liberación con las aguas de lavado. Otro aspecto que se presenta como importante en el artículo, es el estrés ambiental que pueden promover las nanopartículas, que a pesar de que se considera improbable una resistencia microbiana, estas afectaciones al ecosistema puede promover o facilitar la propagación de resistencia a otros contaminantes.

Algunos estudios de nanopartículas de plata muestran que estas no solo se pueden sintetizar en forma esférica, sino también en placas, barras, cubos, entre otras. Los investigadores Sadeghi y colegas (2012) realizaron un estudio para determinar que tanto influía la forma de la nanopartícula en el efecto antibacterial encontrando (Fig. 15).

Se puede ver que los Ag-NPs mostraron la mejor área de superficie y actividad antimicrobiana para los organismos de prueba. Los autores demostraron un marcado aumento en el efecto antimicrobiano de las nanoplacas en comparación con las nanobarras y las nanoesferas, como consecuencia de la mayor área de superficie observada para las nanoplacas.

Otro estudio desarrollado con la síntesis de nano placas triangulares de plata fue desarrollado por Djafari y colegas (2019), en el cual se realiza exitosamente un recubrimiento de sílice y ácido 16-mercaptohexadecanoico (MHA) a los nano

Figura 15.
Influencia de la forma de la nanopartícula de plata en el efecto antibacterial.



Nota. En la parte superior *E. Coli* y en la parte inferior *S. aureus*. (Sadeghi et al., 2012)

triángulos de plata estabilizados con PVP. Los investigadores compararon las propiedades de los nano triángulos funcionalizados con sílice y con MHA, encontrando que las propiedades antibacteriales de las muestras MHA el recubrimiento orgánico, son mejores.

Es también de interés revisar la actividad de otras geometrías de nanopartículas de plata sobre textiles de algodón, este estudio fue realizado por Vukoje y colaboradores (2014). En el cual se sumergió un gramo de tejido sin tratar y tratado con quitosano, en 25 ml de coloide de Ag-NPs triangular durante 30 min y se secó a temperatura ambiente. Después de 5 min de curado a 100 °C, la tela se enjuagó dos veces (5 min) con agua desionizada y se secó a temperatura ambiente.

Al realizar las pruebas microbiológicas encontraron que el tejido tratado con quitosano e impregnado con Ag-NPs proporciona la máxima reducción microbiana en el caso de *E. coli* y *C. albicans* ($R = 99,9\%$) y una reducción microbiana ligeramente menor en el caso de *S. aureus* ($R = 99,6\%$). Los autores concluyen que las Ag Nanoplates proveen una buena actividad bacteriana contra *E. coli* y *S. aureus*.

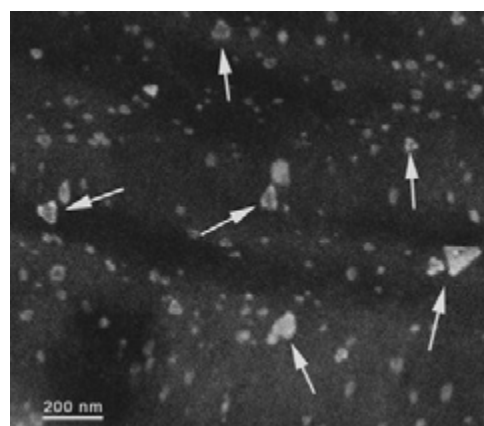
Así como el estudio anterior, Zahran y colegas (2014) realizaron la incorporación de

nanopartículas de plata a tejidos de algodón mediante el método pad-dry-cure. Sumergiendo telas en una solución coloidal de plata, durante 30 segundos, luego se exprimieron, secaron a 75°C durante 15 min y se curaron a 120°C durante 3 min. Cabe aclarar que la solución coloide de nanopartículas esféricas, que utilizaron en el proceso, fueron sintetizadas por los autores utilizando nitrato de plata y alginato como agente reductor. Como resultado de esta investigación se encuentra que con 50ppm de Ag-Nps se puede ver muy buena actividad antibacteriana y la forma de fijación mostró un buen efecto biocida incluso después de 20 ciclos de lavado.

Quitosano

Es un polímero natural extraído del exoesqueleto de crustáceos como camarones y langostas tiene muy buenas propiedades antibacteriales, atribuidas a su comportamiento catiónico. Los mecanismos de acción antimicrobiana del quitosano son: primero la interacción de moléculas de quitosano cargadas positivamente con los grupos negativos de las bacterias, alterando la permeabilidad de la pared celular. Segundo, la interacción de los productos de hidrólisis difusa con el ADN, inhibiendo la síntesis de proteínas; tercero la quelación de nutrientes y metales esenciales para los microorganismos y cuarto crear una membrana que evita el ingreso de nutrientes a la célula, también actuando como barrera de oxígeno. En el artículo de Maliszewska & Czapka (2022), los autores comentan la dificultad que tiene realizar electrospinning de quitosano, debido a que las soluciones de quitosano son usualmente muy viscosas, de baja conductividad, el alto peso molecular del polímero produce fibras de gran diámetro y si ya es demasiado bajo, se generan esferas en lugar de fibras. Asimismo, otra de las desventajas es su baja estabilidad en húmedo y disminución de propiedades mecánicas en

Figura 16.
Nanoplates fijas en el textil.



Nota. Tomado de: (Vukoje et al., 2014)

Tabla 2.
Condiciones de técnica electrospinning para obtener nanofibras de quitosano (CHT).

REF	(SANGSANOH ET AL., 2010)	(HAIDER & PARK, 2009)	(GENG ET AL., 2005)
SOLUCIÓN	7% w/v CHT en 70:30 v/v TFA/DCM	3% wt CHT en TFA	7% wt en 90% w ácido acético
AGUJA	20 G	0.5mm Interno	20 G
VOLTAJE (KV)	25	20	20
DISTANCIA (CM)	20	20	10
FLUJO (ML/H)	Gravedad y fuerzas electrostáticas	0.5 mL/h	1.2 mL/h
RESULTADO	126 nm	235 nm	100-290 nm

solución acuosa. Por lo que, para solucionar este problema, el polímero se mezcla con otros polímeros como PEO, PVA, PLA y PCL.

A pesar de la posible dificultad que pueden presentar la fabricación de nanofibras de quitosano puro, se revisan diferentes condiciones a las que se han obtenido. Esto con el objetivo de que el textil permita ser ese sustrato que contrarreste la debilidad de las fibras, tabla 2.

Igualmente, dentro de la literatura se encuentran las condiciones para obtener nanofibras híbridas de policaprolactona (PCL) y quitosano (CHT) tabla 3.

Como se mencionó anteriormente, otro polímero el cual es bastante utilizado para la obtención de nanofibras híbridas con quitosano es el PEO. Esta mezcla fue estudiada por (Matsumoto et al., 2007) con una concentración de 12 wt% quitosano, 1 wt% PEO, 4 wt% ácido acético en solución acuosa, también utilizando la técnica electrospinning para la fabricación del textil con nanofibras. Al final

realizan un secado en horno a 105°C por 30 min para remover las trazas de ácido acético.

Textiles Antibacteriales en Colombia

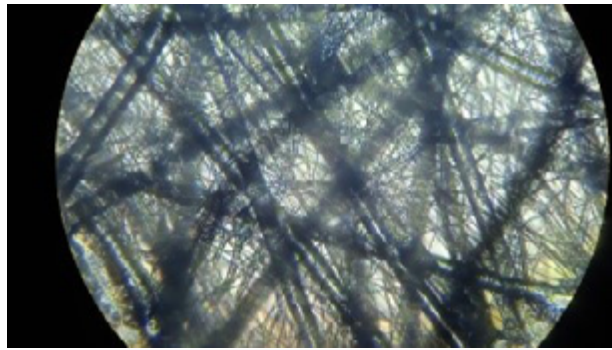
Uno de los textiles más comúnmente utilizados en el área hospitalaria es el obtenido a partir de polipropileno, más conocido en las distribuidoras como tela quirúrgica. Es un textil que internamente cuenta con fibras a escala micrométrica que crean una barrera bacteriana altamente eficiente, sin perder permeabilidad a gases y vapores. Este tipo de tela es fabricado por un proceso conocido en inglés como Melt blowing, el cual consiste en alimentar el polímero termoplástico a una extrusora, la cual cuenta con boquillas de baja apertura y de aire comprimido pasando a alta velocidad, facilitando la formación de microfibras, y finalmente las fibras son recogidas en un tambor rotatorio (Dutton, 2008). Este tipo de tela es utilizada en productos de filtración, adsorbentes, prendas y sistemas de administración de fármacos.

Tabla 3.
Condiciones de técnica electrospinning para obtener nanofibras de quitosano (CHT) mezclado con policaprolactona (PCL).

REF	(HASANPOUR ARDEKANI-ZADEH & HOSSEINI, 2019)	(VAN DER SCHUEREN ET AL., 2012)	(FAHIMIRAD ET AL., 2021)	(LIVERANI ET AL., 2018)
SOLUCIÓN	1% CHT en 1:1 Ácido fórmico (AF) / Ácido acético (AA), mezclado con 6% PCL en mismo solvente.	4-14% PCL mezclado de 0-20% de CHT (con respecto a PCL) 3:7 AA:AF	10% PCL, 3 y 7% de CHT en 7:3 v/v DCM:DMF	6% PCL 3:7 AA:AF con 20% CHT respecto PCL
AGUJA	23G	1.024 mm	0.2 mm	21G
VOLTAJE (KV)	18	5	21	20
DISTANCIA (CM)	15	12.5	12	12.5
FLUJO (ML/H)	0.1	0.6	0.5	0.3
RESULTADO	332.4 nm	154-374 nm	115.6 nm	57 nm

Figura 17.

Imagen obtenida con microscopio óptico del CMTc, de tela quirúrgica, Politéx.



En Colombia, una parte importante de los textiles antibacteriales que se utilizan en las prendas son importados; sin embargo, empresas como Lafayette le apuestan a la innovación en textiles tecnológicos. Ellos cuentan con textiles para el área de la salud con propiedades antivirales, antimicrobiana, antibacterial, antifluído, anticloro y con buenas facilidades de movimiento (Lafayette, 2022). Particularmente para usos en lencería y cortinería en salud, cuentan con el textil Universal Cloro Antimicro (Lafayette, 2022a), a la cual le realizan pruebas en el laboratorio AATCC 100JIS L1902 para confirmar su calidad antibacterial.

Perspectivas

Como resultado de esta revisión bibliográfica, se reconoce que el estudio de nanofibras es de alto impacto para la industria textil, ya que permite dar a los textiles, propiedades y funciones que las fibras a mayor escala no permitirían. Adicionalmente, al ser una técnica tan versátil, permite muchas modificaciones y adiciones a las fibras, que para el caso del efecto antibacterial se vuelve una gran ventaja. De esta forma se pueden agregar agentes antimicrobianos, como nanopartículas de plata, titanio o cobre, triclosán, aceites esenciales entre otros, a las nanofibras; así como fabricar fibras con materiales antibacteriales como el quitosano. A pesar de todas las ventajas, la manufactura de nanofibras aún es una tecnología emergente, como nos comentan Barhoum y colegas (2019) en el artículo de revisión, se presentan varios desafíos con las técnicas, como la fabricación a mayor escala y el uso de materiales verdes, pues en muchos casos los solventes y polímeros utilizados generan un alto impacto ambiental. Por otro lado, Krifa y Prichard (2020) recomiendan enfocar los temas de investigación futuros, en la incorporación de nanopartículas en acabados multifuncionales y utilizar varios métodos de hilado para formar estructuras nano fibrosas con porosidad.

Referencias bibliográficas

- AATCC 100—Antimicrobial Fabric Testing—Microbe Investigations. (s. f.). Swiss Anti-Bacterial & Anti-Viral Testing Laboratory, ISO Certified | MIS. Recuperado 13 de agosto de 2022, de <https://microbe-investigations.com/aatcc-100/>
- Alghoraibi, I., & Alomari, S. (2018). Different Methods for Nanofiber Design and Fabrication. En A. Barhoum, M. Bechelany, & A. Makhoulf (Eds.), *Handbook of Nanofibers* (pp. 1-46). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42789-8_11-2
- Barhoum, A., Pal, K., Rahier, H., Uludag, H., Kim, I. S., & Bechelany, M. (2019). Nanofibers as new-generation materials: From spinning and nano-spinning fabrication techniques to emerging applications. *Applied Materials Today*, 17, 1-35. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.06.015>
- Brown, P. J., & Stevens, K. A. (2007). *Nanofibers and nanotechnology in textiles*. CRC press.
- Clavijo-Grimaldo Dianney, Ponce-Zapata Nubia, & Casadiego-Torrado Ciro. (2019). Control of Bacterial Proliferation and Formation of Biofilm in Membranes for Food Packaging Manufactured by Electrospinning. *Chemical Engineering Transactions*, 75, 241-246. <https://doi.org/10.3303/CET1975041>
- Dabirian, F., Ravandi, S. A. H., Hinestroza, J. P., & Abuzade, R. A. (2012). Conformal coating of yarns and wires with electrospun nanofibers. *Polymer Engineering & Science*, 52(8), 1724-1732. <https://doi.org/10.1002/pen.23109>
- Ding, B., Wang, X., & Yu, J. (2018). *Electrospinning: Nanofabrication and applications* (1st edition). Elsevier.
- Djafari, J., Fernández-Lodeiro, C., Fernández-Lodeiro, A., Silva, V., Poeta, P., Igrejas, G., Lodeiro, C., Capelo, J. L., & Fernández-Lodeiro, J. (2019). Exploring the Control in Antibacterial Activity of Silver Triangular Nanoplates by Surface Coating Modulation. *Frontiers in Chemistry*, 6. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fchem.2018.00677>
- Dutton, K. (2008). Overview and Analysis of the Meltblown Process and Parameters. *Journal of Textile and Apparel Technology and Management*, 6(1).
- Fahimirad, S., Abtahi, H., Satei, P., Ghaznavi-Rad, E., Moslehi, M., & Ganji, A. (2021). Wound healing performance of PCL/chitosan based electrospun nanofiber electrosprayed with curcumin loaded chitosan nanoparticles. *Carbohydrate Polymers*, 259, 117640. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117640>
- Gao, Y., Bach Truong, Y., Zhu, Y., & Louis Kyratzis, I. (2014). Electrospun antibacterial nanofibers: Production, activity, and in vivo applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(18), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/app.40797>
- Geng, X., Kwon, O., & Jang, J. (2005). Electrospinning of chitosan dissolved in concentrated acetic acid solution. *Biomaterials*, 26(27), 5427-5432. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.01.066>
- Gulati, R., Sharma, S., & Sharma, R. K. (2021). Antimicrobial textile: Recent developments and functional perspective. *Polymer Bulletin*. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03826-3>
- Haider, S., & Park, S.-Y. (2009). Preparation of the electrospun chitosan nanofibers and their applications to the adsorption of Cu(II) and Pb(II) ions from an aqueous solution. *Journal of Membrane Science*, 328(1), 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.11.046>
- Hasanpour Ardekani-Zadeh, A., & Hosseini, S. F. (2019). Electrospun essential oil-doped chitosan/poly(L-caprolactone) hybrid nanofibrous mats for antimicrobial food biopackaging exploits. *Carbohydrate Polymers*, 223, 115108. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115108>
- He, J.-X., Zhou, Y.-M., Wu, Y.-C., & Liu, R.-T. (2014). Nanofiber coated hybrid yarn fabricated by novel electrospinning-airflow twisting method. *Surface and Coatings Technology*, 258, 398-404. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.062>
- Huang, W., Tao, F., Li, F., Mortimer, M., & Guo, L.-H. (2020). Antibacterial nanomaterials for environmental and consumer product applications. *NanoImpact*, 20, 100268. <https://doi.org/10.1016/j.nimpact.2020.100268>

- Ibrahim. (2015). Nanomaterials for antibacterial textiles. *En Nanotechnology in Diagnosis, Treatment, and Prophylaxis of Infectious Diseases*.
- Idumah, C. I. (2021). Influence of nanotechnology in polymeric textiles, applications, and fight against COVID-19. *The Journal of The Textile Institute*, 112(12), 2056-2076. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1858600>
- Jia, L., Huang, X., Liang, H., & Tao, Q. (2019). Enhanced hydrophilic and antibacterial efficiencies by the synergetic effect TiO₂ nanofiber and graphene oxide in cellulose acetate nanofibers. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132, 1039-1043. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.204>
- Jiang, G., Zhang, J., Ji, D., Qin, X., Ge, Y., & Xie, S. (2017). A novel approach for fabricating antibacterial nanofiber/cotton hybrid yarns. *Fibers and Polymers*, 18(5), 987-992. <https://doi.org/10.1007/s12221-017-1194-6>
- Kovalova, Z., Leroy, M., Kirkpatrick, M. J., Odic, E., & Machala, Z. (2016). Corona discharges with water electrospray for *Escherichia coli* biofilm eradication on a surface. *Bioelectrochemistry*, 112, 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2016.05.002>
- Krifa, M., & Prichard, C. (2020). Nanotechnology in textile and apparel research – an overview of technologies and processes. *The Journal of The Textile Institute*, 111(12), 1778-1793. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1721696>
- Lafayette. (2022a). Ficha-tecnica-comercial-universal-cloro-antimicrobial-281220.pdf. <https://www.lafayettedeco.com/contract/wp-content/uploads/sites/3/2020/04/ficha-tecnica-comercial-universal-cloro-antimicrobial-281220.pdf>
- Lafayette. (2022). Productos Salud. Lafayette. <https://uniformelafayette.com/salud/productos-salud/>
- Levitt, A. S., Knittel, C. E., Vallett, R., Koerner, M., Dion, G., & Schauer, C. L. (2017). Investigation of nanoyarn preparation by modified electrospinning setup. *Journal of applied polymer science*, 134(19), 44813. <https://doi.org/10.1002/app.44813>
- Lim, E.-H., Sardinha, J. P., & Myers, S. (2014). Nanotechnology Biomimetic Cartilage Regenerative Scaffolds. *Archives of Plastic Surgery*, 41(03), 231-240. <https://doi.org/10.5999/aps.2014.41.3.231>
- Liverani, L., Lacina, J., Roether, J. A., Boccardi, E., Killian, M. S., Schmuki, P., Schubert, D. W., & Boccaccini, A. R. (2018). Incorporation of bioactive glass nanoparticles in electrospun PCL/chitosan fibers by using benign solvents. *Bioactive Materials*, 3(1), 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2017.05.003>
- Maliszewska, I., & Czapka, T. (2022). Electrospun Polymer Nanofibers with Antimicrobial Activity. *Polymers*, 14(9), 1661. <https://doi.org/10.3390/polym14091661>
- Mallakpour, S., Azadi, E., & Hussain, C. M. (2021). Recent breakthroughs of antibacterial and antiviral protective polymeric materials during COVID-19 pandemic and after pandemic: Coating, packaging, and textile applications. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 55, 101480. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2021.101480>
- Matsumoto, H., & Tanioka, A. (2011). Functionality in Electrospun Nanofibrous Membranes Based on Fiber's Size, Surface Area, and Molecular Orientation. *Membranes*, 1(3), 249-264. <https://doi.org/10.3390/membranes1030249>
- Matsumoto, H., Yako, H., Minagawa, M., & Tanioka, A. (2007). Characterization of chitosan nanofiber fabric by electrospray deposition: Electrokinetic and adsorption behavior. *Journal of Colloid and Interface Science*, 310(2), 678-681. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.02.017>
- Mirjalili, M., & Zohoori, S. (2016). Review for application of electrospinning and electrospun nanofibers technology in textile industry. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 6(3), 207-213. <https://doi.org/10.1007/s40097-016-0189-y>
- Muñoz, L. (2019). Acabados Antimicrobianos en Textiles: Tendencias y Aplicaciones. *Encuentro Sennova del Oriente Antioqueño*.
- Petrova, L. S., Yaminzoda, Z. A., Odintsova, O. I., Vladimirtseva, E. L., Solov'eva, A. A., & Smirnova, A. S. (2021). Promising Methods of Antibacterial Finishing of Textile Materials. *Russian Journal of General Chemistry*, 91(12), 2758-2767. <https://doi.org/10.1134/S1070363221120549>
- Pinho, E., Magalhães, L., Henriques, M., & Oliveira, R. (2011). Antimicrobial activity assessment of textiles: Standard methods comparison. *Annals of Microbiology*, 61(3), 493-498. <https://doi.org/10.1007/s13213-010-0163-8>
- Qiu, Q., Chen, S., Li, Y., Yang, Y., Zhang, H., Quan, Z., Qin, X., Wang, R., & Yu, J. (2020). Functional nanofibers embedded into textiles for durable antibacterial properties. *Chemical Engineering Journal*, 384, 123241. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123241>
- Rodríguez, P. A. (2018). Hans Christian Gram y su tinción. *Dermatología Cosmética, Médica y Quirúrgica*, 16(2), 2.
- Sadeghi, B., Garmaroudi, F. S., Hashemi, M., Nezhad, H. R., Nasrollahi, A., Ardalani, S., & Ardalani, S. (2012). Comparison of the anti-bacterial activity on the nanosilver shapes: Nanoparticles, nanorods and nanoplates. *Advanced Powder Technology*, 23(1), 22-26. <https://doi.org/10.1016/j.japt.2010.11.011>
- Sangsano, P., Suwantong, O., Neamark, A., Cheepsunthorn, P., Pavasant, P., & Supaphol, P. (2010). In vitro biocompatibility of electrospun and solvent-cast chitosan substrata towards Schwann, osteoblast, keratinocyte and fibroblast cells. *European Polymer Journal*, 46(3), 428-440. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2009.10.029>
- Schneider, G., Bim, F. L., de Sousa, Á. F. L., Watanabe, E., de Andrade, D., & Fronteira, I. (2021). The use of antimicrobial-impregnated fabrics in health services: An integrative review. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, 29, e3416. <https://doi.org/10.1590/1518-8345.4668.3416>
- Shateri Khalil-Abad, M., & Yazdanshenas, M. E. (2010). Superhydrophobic antibacterial cotton textiles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 351(1), 293-298. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.07.049>
- The Lens—Free & Open Patent and Scholarly Search. (s. f.). The Lens - Free & Open Patent and Scholarly Search. Recuperado 22 de junio de 2020, de <https://www.lens.org/lens>
- Universidad de Sevilla (Director). (2021, septiembre 24). Electrospinning: Hilando materiales. <https://www.youtube.com/watch?v=RW8rKeav8YQ>
- Van der Schueren, L., Steyaert, I., De Schoenmaker, B., & De Clerck, K. (2012). Polycaprolactone/chitosan blend nanofibers electrospun from an acetic acid/formic acid solvent system. *Carbohydrate Polymers*, 88(4), 1221-1226. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.01.085>
- Vukoje, I., Lazić, V., Vodnik, V., Mitrić, M., Jokić, B., Phillip Ahrenkiel, S., Nedeljković, J. M., & Radetić, M. (2014). The influence of triangular silver nanoplates on antimicrobial activity and color of cotton fabrics pretreated with chitosan. *Journal of Materials Science*, 49(13), 4453-4460. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8142-2>
- Williams, G. R., Raimi-Abraham, B. T., & Luo, C. J. (2018). Electrospinning fundamentals. *En Nanofibers in Drug Delivery* (pp. 24-59). UCL Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctv550dd16>
- Wu, S., Dong, T., Li, Y., Sun, M., Qi, Y., Liu, J., Kuss, M. A., Chen, S., & Duan, B. (2022). State-of-the-art review of advanced electrospun nanofiber yarn-based textiles for biomedical applications. *Applied Materials Today*, 27, 101473. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2022.101473>
- Yetisen, A. K., Qu, H., Manbachi, A., Butt, H., Dokmeci, M. R., Hinestroza, J. P., Skorobogatiy, M., Khademhosseini, A., & Yun, S. H. (2016). Nanotechnology in Textiles. *ACS Nano*, 10(3), 3042-3068. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b08176>
- Yu, W., Li, X., He, J., Chen, Y., Qi, L., Yuan, P., Ou, K., Liu, F., Zhou, Y., & Qin, X. (2021). Graphene oxide-silver nanocomposites embedded nanofiber core-spun yarns for durable antibacterial textiles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 584, 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.09.092>
- Zahrán, M. K., Ahmed, H. B., & El-Rafie, M. H. (2014). Surface modification of cotton fabrics for antibacterial application by coating with AgNPs-alginate composite. *Carbohydrate Polymers*, 108, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.005>
- Zaikov. (2017). Nanofibers and nanotechnology in textiles: A far-reaching and comprehensive review. *Polymers Research Journal*, 11(3).