

<https://doi.org/10.69639/arandu.v12i2.928>

Influencia de los parámetros del electrohilado en la morfología y tamaño de las fibras de polisiloxano

Influence of electrospinning parameters on the morphology and size of polysiloxane fibers

Oscar Iván Analuiza Maiza

oi.analuiza@uta.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4383-6073>

Universidad Técnica de Ambato
Ambato – Ecuador

Víctor Rodrigo Espín Guerrero

victorrespin@uta.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6132-3215>

Universidad Técnica de Ambato
Ambato – Ecuador

Jorge Enrique López Velastegui

je.lopez@uta.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0306-7740>

Universidad Técnica de Ambato
Ambato – Ecuador

María Belén Paredes Robalino

mb.paredes@uta.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8013-2884>

Universidad Técnica de Ambato
Ambato – Ecuador

Artículo recibido: 10 marzo 2025

- Aceptado para publicación: 20 abril 2025

Conflictos de intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN

El electrohilado es un proceso que ha cobrado gran interés en la elaboración de fibras utilizando soluciones poliméricas. En esta investigación se estudia la influencia de los parámetros del proceso de electrohilado sobre la morfología y el tamaño de las fibras de polisiloxano. Los parámetros principales analizados comprenden la viscosidad de la solución, el voltaje aplicado y la separación entre la aguja y colector. Se utilizó un polímero comercial como el polisiloxano con 70% y el etanol con 30% como solvente para formar la solución polimérica. Los parámetros como el voltaje varían de 10 kV a 15 kV y la distancia de aguja – colector son de 10, 17.5 y 25 cm. A las microfibras se realizó un estudio morfológico mediante un microscopio electrónico de barrido en la que se visualiza los defectos estructurales como grumos, goteos y los diámetros de las microfibras. Se determinó que el menor diámetro es de 0.57 μm para los parámetros de 25 cm de distancia entre el aguja - colector y 11 kV de voltaje. La investigación evidencia que tanto la distancia como el voltaje ejercen un impacto considerable y compartido en el diámetro de las

fibras electrohiladas. En las condiciones evaluadas, la aplicación de 15 kV y distancias de 17.5 a 25 cm permite obtener diámetros reducidos con excelentes propiedades morfológicas

Palabras clave: electrohilado, parámetro, microfibras, polisiloxano

ABSTRACT

Electrospinning is a process that has gained significant interest in the production of fibers using polymer solutions. This research studies the influence of electrospinning process parameters on the morphology and size of polysiloxane fibers. The main parameters analyzed include solution viscosity, applied voltage, and the distance between the needle and the collector. A commercial polymer, polysiloxane with 70%, and ethanol with 30% as a solvent were used to form the polymer solution. Parameters such as voltage range from 10 kV to 15 kV, and the needle-collector distance is 10, 17.5, and 25 cm. A morphological study of the microfibras was performed using a scanning electron microscope, in which structural defects such as clumps, droplets, and fiber diameters were visualized. It was determined that the smallest diameter is 0.57 μm for the parameters of 25 cm needle-collector distance and 11 kV voltage. The research shows that both distance and voltage have a considerable and shared impact on the diameter of electrospun fibers. Under the evaluated conditions, applying 15 kV and distances from 17.5 to 25 cm results in reduced diameters with excellent morphological properties.

Keywords: electrospinning, parameter, microfibras, polysiloxane

INTRODUCCIÓN

Se han desarrollado muchos métodos para producir fibras a partir de polímeros sintéticos, en particular los basados en hilado húmedo, seco, fundido y en gel. El método del electrohilado abre las puertas a la producción de fibras ultrafinas con diámetros que van desde decenas de nanómetros hasta varios micrómetros. En general, el electrohilado permite la producción sencilla de fibras continuas (Xue et al., 2019). El electrohilado se ha estudiado activamente debido a su eficiencia, flexibilidad y versatilidad en la fabricación de estructuras fibrosas. Además de los andamios celulares en ingeniería de tejidos, las fibras electrohiladas han encontrado una amplia variedad de aplicaciones industriales para herramientas futuras como ropa protectora, apósitos para heridas, membranas de filtración, materiales compuestos, sistemas biomédicos de liberación de fármacos y dispositivos transparentes flexibles (Nakano et al., 2012). El electrohilado es una tecnología versátil y de bajo costo que permite la producción de fibras a partir de una amplia gama de polímeros. Algunos polímeros, como la poliamida (PA), el tereftalato de polietileno, el poliacrilonitrilo (PAN), polisiloxano, el ácido poliláctico (PLA) y el alcohol polivinílico, se han electrohilado ampliamente para fines de filtración de aire y se utilizan a menudo para textiles no tejidos fundidos por soplado o spunbond (Membranes & Materials, 2024). Las fibras han atraído una atención cada vez mayor en los últimos 10 años debido a su alta relación superficie / masa y características especiales atractivas para aplicaciones avanzadas (Feng et al., 2013). No obstante, la forma y el tamaño de las fibras de polisiloxano producidas mediante electrohilado están fuertemente influenciados por los parámetros del procedimiento, como el voltaje aplicado, la velocidad de flujo de la solución polimérica, la solución y la distancia entre aguja y el colector (Ruiz, 2015).

Las nuevas nanoestructuras han impulsado el interés de científicos e ingenieros para producir nanoestructuras que optimicen los procesos e incrementen la producción (Robles-García et al., 2014). La creciente demanda de los materiales avanzados y optimizar el proceso de electrohilado es de gran importancia para el desarrollo de soluciones tecnológicas innovadoras. La producción de fibras por electrohilado presenta una ventaja significativa en términos de versatilidad y control de propiedades. Es transcendental mejorar los parámetros del electrohilado para asegurar la forma y el tamaño de las fibras de polisiloxano, lo que a su vez define sus características y usos. (Bognitzki et al., 2001). Además, es significativo relacionar los parámetros del electrohilado y las características de las fibras para el desarrollo de nuevas aplicaciones, especialmente en nuevos materiales lo que ha conllevado en especial a nuestro análisis.

Para lograr la formación de fibras finas de polímeros mediante electrohilado, primero se deben seleccionar con cuidado solventes adecuados que puedan disolver los polímeros deseados, en vista que estas características de la solución podrían afectar los diámetros resultantes de las estructuras fibrosas (Nakano et al., 2012). Una vez definido los componentes se establecen los

parámetros del proceso como: viscosidad, voltaje, velocidad y distancia del proceso de producción. Estudios previos revelaron el impacto de los parámetros del electrohilado en la forma y el tamaño de las fibras. Por ejemplo, en 1887, Charles V. Boys informó que se podían extraer fibras de un líquido viscoelástico en presencia de un campo eléctrico externo. Utilizó un aparato compuesto por una placa aislante conectada a una fuente de alimentación eléctrica. Demostró que un líquido viscoso (por ejemplo, cera de abejas y colodión) podía transformarse en fibras al desplazarse hasta el borde de la placa (Xue et al., 2019). Asimismo, Darrell H Reneker ha evidenciado que el incremento del voltaje aplicado lleva a la creación de las fibras más finas y homogéneas, mientras que el incremento de la velocidad de flujo provoca la creación de fibras más largas y con más imperfecciones (Ramakrishna et al., 1996). También, en la investigación (Membranes & Materials, 2024) concluyen que: “Los parámetros de voltaje aplicado, caudal de la solución y diámetro interior del capilar tuvieron un efecto significativo en la estructura superficial.”.

En cuanto al parámetro de velocidad, (El-hadi & Al-Jabri, 2016) indicó “El diámetro de las fibras electrohiladas disminuye con el aumento de la velocidad del colector para las mezclas en comparación con el PHB puro, que tiene un diámetro de aproximadamente 6 μm . Las fibras obtenidas de las mezclas se reducen a 2 μm .”. Por lo tanto, (Anún et al., 2018) indica que los parámetros configurados en el proceso son fuertemente determinantes de la calidad, morfología y tamaño de las fibras. Es importante este análisis en vista que las nanofibras elaboradas mediante el método de electrohilado permiten su utilización en el área biomédica, aumentando con esto las ventajas de su utilización en ingeniería de tejidos (Jacobs & Kelly, 2011). No obstante, la mayoría de estas investigaciones han puesto énfasis en un aspecto restringido de parámetros del electrohilado y no han tenido en cuenta la interrelación entre los distintos factores. Así pues, resulta imprescindible llevar a cabo una investigación más detallada que explore el impacto de un espectro más extenso de parámetros del electrohilado y que considere la interacción entre los diferentes parámetros.

Igualmente, las nanofibras obtenidas mediante electrohilado han mostrado un excelente potencial en diversas aplicaciones. Entre ellos: el estudio de (Manuel et al., 2013) indica que se obtuvo fibras de una solución de polipirrol, óxido de polietileno y nylon-6, los resultados indican que los diámetros obtenidos del composite están en un rango micro y nanométrico. Finalmente, se utilizan en diferentes industrias tales como textil, cuero, cosméticos, entrega de medicamentos, cuidado de telas, recubrimientos, pinturas y latinas, gomas, selladores, adhesivos, industria de construcción, acristalamiento estructural, airbags, electrónica (Special et al., 2010).

El electrohilado implica un proceso electrohidrodinámico, durante el cual se electrifica una gota de líquido para generar un chorro, seguido de estiramiento y elongación para generar fibras (Xue et al., 2019). El electrohilado consiste en tres componentes principales, una fuente de

alimentación de alto voltaje, un colector (placa de metal, etc.) y una jeringa con su aguja correspondiente. La fuente de alta tensión se utiliza para cargar con cierta polaridad la solución de polímero, que luego se acelera hacia el colector de polaridad opuesta. Esta técnica se basa en la deformación uniaxial o elongación de una gota de líquido viscoelástico de un polímero (fundido o disuelto) para formar un filamento (Cano et al., 2010). Una solución de polímero cargada que sale del capilar hacia el colector conectado a tierra en un campo electrostático fuerte. Este último causa la gota que emerge del extremo capilar para sufrir una deformación en una forma cónica, comúnmente llamado el "cono de Taylor". A medida que la fuerza del potencial aplicado aumenta a el punto en el que la fuerza electrostática ha superado la tensión superficial de la solución, emerge un chorro fino de la solución. Durante esta fase, el chorro es atraído por al menos dos órdenes de magnitud, el solvente se evapora, y las fibras secas se depositan en el colector (Moghe & Gupta, 2008). Actualmente hay dos configuraciones de electrohilado estándar, posición vertical y horizontal. En el conjunto horizontal, se evita la contaminación de la muestra por el goteo de la solución sobre el colector, mientras que, en el montaje vertical, la gravedad a su vez es una fuerza que ayuda al campo eléctrico en el avance de la solución (Cano et al., 2010).

Los factores que influyen el proceso de electrohilado (Frey, 2008), pueden ser controlados y permite obtener nanofibras con numerosas ventajas como: diámetros fibrosos; estructura de la fibra y el diámetro con precisión; el área superficial específica grande; alto grado de orientación, lo cual ayuda a aumentar la resistencia mecánica (Su et al., 2013). Se pueden argumentar varias relaciones generales entre los parámetros del proceso y la morfología de la fibra, es importante darse cuenta de que la relación exacta será diferente para cada polímero y disolvente utilizado en el sistema (Cano et al., 2010).

Más de 100 polímeros, tanto sintéticos como naturales, se han electrohilado con éxito en nanofibras, principalmente a partir de soluciones poliméricas, ya que cualquier polímero puede electrohilarse en nanofibras, siempre que el peso molecular del polímero sea suficientemente alto y el disolvente se pueda evaporar en tiempo durante el período de tránsito del chorro sobre una distancia entre la jeringa y el colector (Feng et al., 2013). El polisiloxano está basado en polidimetilsiloxano (PDMS) (MARK, 2005). Es un polímero compuesto de macromoléculas, con frecuencia se refiere a las siliconas (Special et al., 2010). Además, las siliconas son materiales poliméricos que contienen enlaces silicio-oxígeno y radicales hidrocarbonados combinados directamente con el silicio (Directiva & Adjuntos, 2004). Presenta propiedades de gran interés como por ejemplo alta flexibilidad, alta estabilidad química, hidrofobicidad, resistencia a la radiación UV y biocompatibilidad (MARK, 2005). Se ha dado una fuerte tendencia de emplear disolventes polares tales como el alcohol y el agua que presentan prácticamente, un nulo impacto al medio ambiente (Principal, 2013). Esto hace que las nanofibras poliméricas sean el candidato óptimo para varias aplicaciones (Jagadeesh Babu et al., 2007).

El objetivo de esta investigación es analizar la influencia de los parámetros del electrohilado en la morfología y tamaño de las fibras de polisiloxano. Además, en esta investigación analizaremos de manera sistemática el impacto de los parámetros del electrohilado, que incluyen el voltaje aplicado, la composición y la separación entre la aguja y el colector, en la forma y el tamaño de las fibras de polisiloxano. Con ello, se establece los parámetros ideales del electrohilado para lograr fibras de polisiloxano con control en la morfología y tamaño. Los hallazgos de esta investigación pueden emplearse para mejorar los parámetros y lograr fibras con características requeridas para diferentes usos. Finalmente, este estudio ofrece un fundamento para la creación de nuevos materiales de polisiloxano con características optimas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se enfocó en el análisis cuantitativo. En el estudio se analizó la influencia de los parámetros del electrohilado en la morfología y tamaño de las fibras de polisiloxano, que se describen a continuación:

En la Figura 1, se muestra la solución polimérica en la que se utilizó: 70% de solvente (etanol de constante dieléctrica 24 y tensión superficial de 21,6 mN/m) y un 30% de polímero (polisiloxano de constante dieléctrica 3,5 y tensión superficial de 24 mN/m), se mezcló mediante un agitador a 50 rpm y se obtuvo tres soluciones.

Figura 1
Solución polimérica

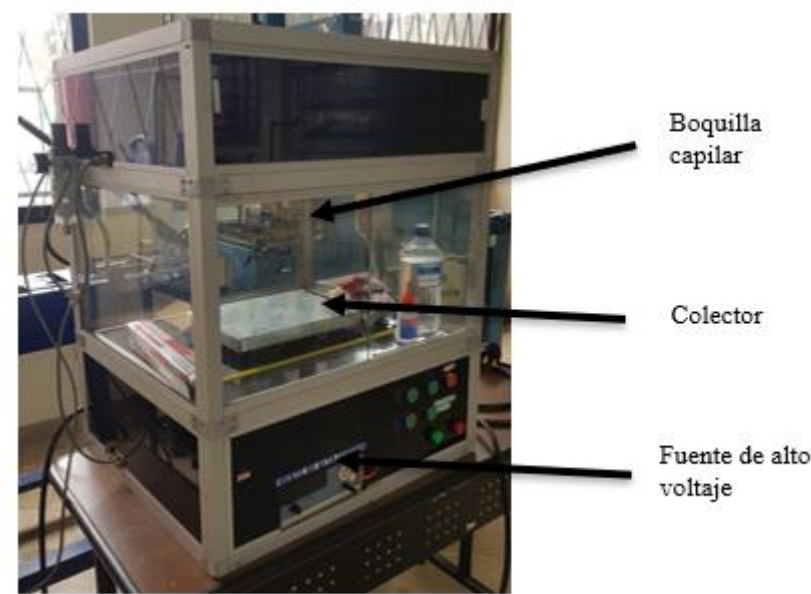


Para determinar el pH de las soluciones poliméricas se utilizó un pHmetro Thremo Scientidic ORION VERSASTAR a temperatura ambiente. Asimismo, la viscosidad de las soluciones se determinó con el viscosímetro rotacional (Brookfield) a temperatura ambiente. Se utilizó el husillo # 1 en las muestras con presentaciones de 150 ml. Los ensayos se realizaron a velocidades de corte a 20 rpm del husillo.

Una vez realizados los ensayos físicos se procedió a la elaboración de la fibra en la que se utilizó la máquina de electrohilado tipo vertical (Figura 2) que funciona a una tensión en rango de 1 - 15 KV; el intervalo de distancia entre la aguja y el colector es de 1 – 25 cm. La solución polimérica obtenida se introdujo en una jeringa de volumen de 10 ml que fue inyectado a una

velocidad constante de 1 ml/h. Se utilizó un colector fijo cubierto con una lámina de papel aluminio con dimensiones 21x29,7 cm.

Figura 2
Máquina de Electrohilado



Se consideró las distancias de 10, 17.5 y 25 cm entre la punta de la aguja y el colector, así también se estableció los voltajes de 10, 11 12, 13, 14 y 15 kV, que permitió formar las combinaciones y definir 18 muestras que se indica en la Tabla 1.

Tabla 1
Distancias utilizadas con variación de voltaje

Solución (Código)	Muestras	Distancia (cm)	Voltaje (kV)
S1 (56)	M1	10	10
	M2	10	11
	M3	10	12
	M4	10	13
	M5	10	14
	M6	10	15
S2 (57)	M7	17.5	10
	M8	17.5	11
	M9	17.5	12
	M10	17.5	13
	M11	17.5	14
	M12	17.5	15
S3 (58)	M13	25	10
	M14	25	11
	M15	25	12
	M16	25	13
	M17	25	14
	M18	25	15

Las microfibras elaboradas bajo los diferentes parámetros por la técnica del electrohilado fueron depositadas en papel aluminio, posteriormente fueron extraídas una sección con dimensión de 1 x 1 cm, para proceder al micro galvanizado en oro utilizando un sputter coater (Quarum Q150R). Este recubrimiento se realizó con el objetivo de mejorar la conductividad de la muestra y permitió obtener imágenes de alta resolución. Por otro lado, para determinar la morfología y el tamaño de las microfibras se utilizó el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) modelo TESCAN 01. Las imágenes fueron capturadas a 1500X y 2000X. En las imágenes se visualizó las microfibras, los defectos estructurales y los diámetros de fibra en tres puntos aleatorios de cada muestra.

Finalmente, se llevó a cabo un estudio estadístico de la información recabada para establecer el impacto de los parámetros del electrohilado en la forma y tamaño de las fibras. Primeramente, se determinó el pH, posteriormente el análisis de viscosidad que es esencial para relacionar con la concentración de la solución. Posteriormente, en el SEM se tomó tres mediciones en distintos puntos de cada imagen con el propósito de obtener un promedio de cada una de las muestras. A continuación, se determinó la microfibra con el menor diámetro y las mejores microfibras obtenidas. En todos los estudios se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para establecer la relevancia estadística de los hallazgos.

RESULTADOS

En la Tabla 2, se muestra el promedio de la solución polimérica (S1, S2 y S3) con un pH promedio de 4,56. Los valores de pH muestran un rango bajo y presenta un carácter ligeramente ácido. La estabilidad del pH es importante para una buena consistencia en el proceso de electrohilado, su variación afecta su solubilidad y la conductividad de la solución. Además, se obtuvo la viscosidad con un promedio de 5,71 Pa x s con una ligera variación. La viscosidad es importante dentro del proceso de electrohilado. Una baja viscosidad permitirá obtener fibras delgadas e inestables, mientras que una alta viscosidad permitirá obtener fibras gruesas e incluso la formación de grumos o gotas.

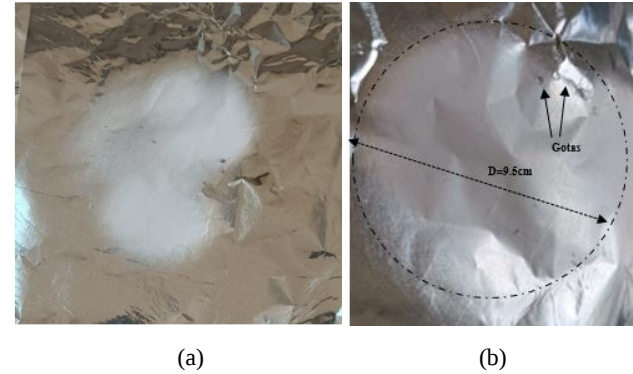
Tabla 2
Promedio de pH y viscosidad de la solución polimérica

Solución	pH	Viscosidad (Pa x s)
S1	4.6 ± 0,01	5.83 ± 0,01
S2	4.5 ± 0,02	5.41 ± 0,02
S3	4.6 ± 0,01	5.89 ± 0,01
PROMDEIO	4.56	5.71

En la Figura 3, se observa la caída y acumulación de la microfibra de acuerdo con los parámetros establecidos obteniendo microfibras constantes en forma de un cono bien definido, esto indica que el proceso de electrohilado fue estable y continuo. La formación del cono proporciona información respecto a la dispersión del chorro de la solución polimérica. En nuestro

experimento la membrana tiene un diámetro de 9.5 cm lo que indica una buena dispersión. Además, la aparición blanca y opaca indica que las fibras son densas y tiene una alta área de superficie.

Figura 3
Electrohilado de microfibr de la M14: (a) Membrana; (b) Diámetro de la membrana



En la Tabla 3, se presenta el promedio de los diámetros de la microfibr de polisiloxano obtenidas mediante el SEM, en función de la distancia de la aguja – colector (10, 17.5 y 25 cm) y las variaciones de voltaje aplicado (10, 11, 12, 13, 14 y 15 kV).

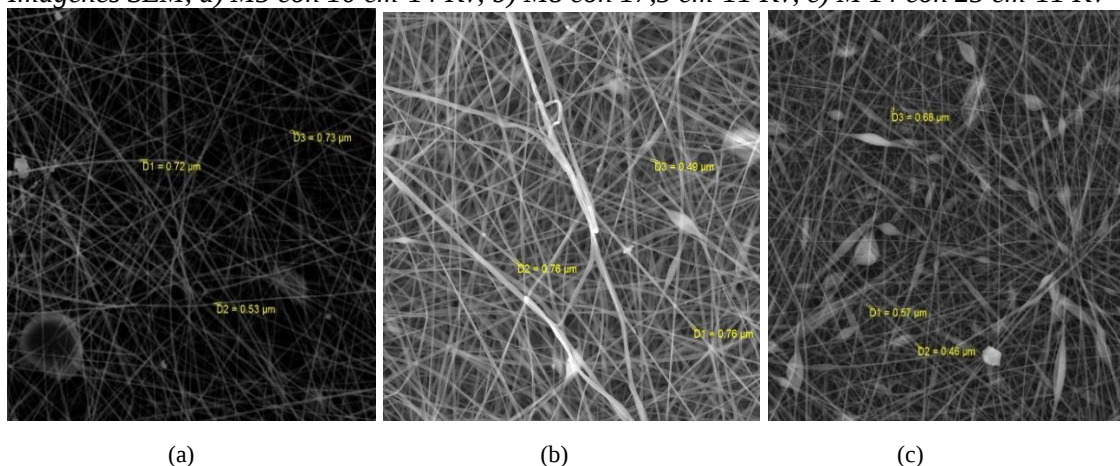
Tabla 3
Diámetros promedios obtenidos por el SEM

Muestras	Diámetro promedio (µm)
M1	1,43
M2	0,89
M3	0,94
M4	0,73
M5	0,66
M6	1,19
M7	0,78
M8	0,67
M9	0,87
M10	1,03
M11	0,75
M12	0,73
M13	0,61
M14	0,57
M15	0,85
M16	0,87
M17	0,73
M18	0,65

A continuación, se presentan las imágenes con diámetros máximos y mínimos de las fibras. Las imágenes con menor diámetro obtenidas en el SEM captadas a 20 µm se muestran en la Figura 4. La figura (a) muestra fibras con un diámetro promedio de 0.66 µm sin cortes de flujo y entre cruzadas, la figura (b) presenta un diámetro promedio de 0.67 µm y grumos muy pequeños, y la imagen (c) presenta un diámetro promedio de 0.57 µm y existe gran cantidad de grumos.

Figura 4

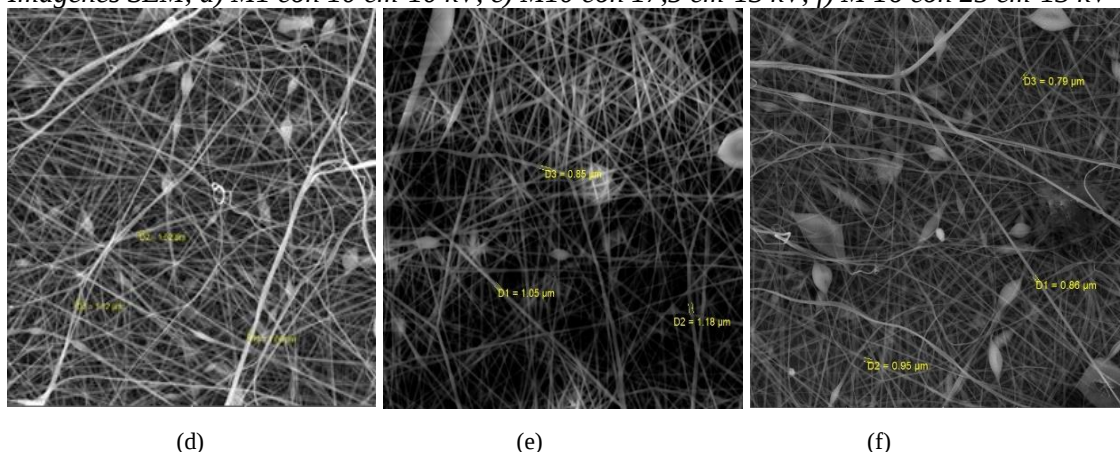
Imágenes SEM, a) M5 con 10 cm-14 Kv, b) M8 con 17,5 cm-11 Kv, c) M 14 con 25 cm-11 Kv



Las imágenes con mayor diámetro obtenidas en el SEM captadas a 20 μm se muestran en la Figura 5. La figura (a) muestra fibras con un diámetro promedio de 1.43 μm y con poca cantidad de grumos, la figura (b) presenta un diámetro promedio de 1.03 μm con grumos muy pequeños y discontinuidades en las membranas más gruesas, y la imagen (c) presenta un diámetro promedio de 0.87 μm con gran cantidad de grumos y discontinuidades, lo cual no es beneficioso.

Figura 5

Imágenes SEM, d) M1 con 10 cm-10 kV, e) M10 con 17,5 cm-13 kV, f) M 16 con 25 cm-13 kV

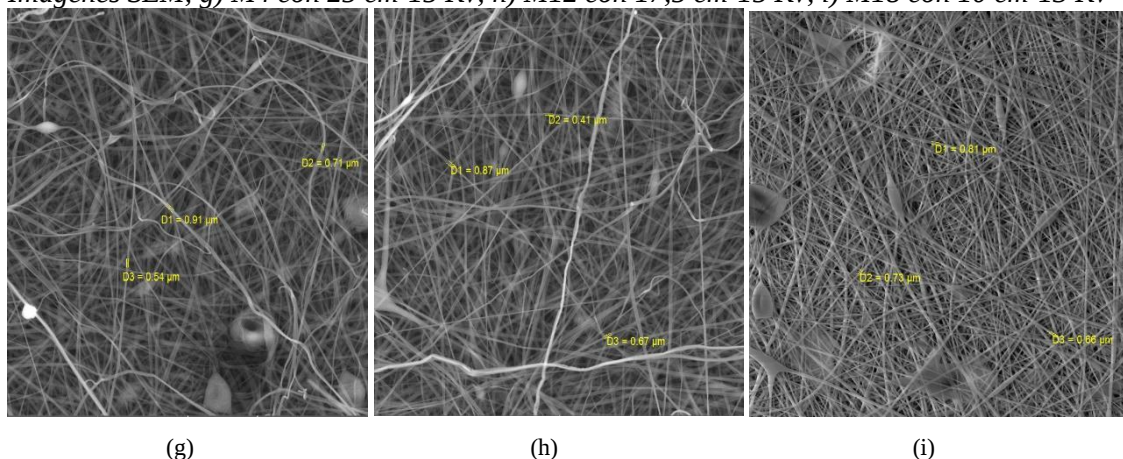


Las muestras M5, M8 y M14 son las de menor diámetro y se observa una ligera tendencia a la disminución del diámetro de las fibras a medida que se incrementa la distancia entre la aguja-colector, y el voltaje es de 11 y 14 V. Las muestras M1, M10 y M16 son las de mayor diámetro y tienden a la disminución del diámetro a medida que se aumenta la distancia entre el colector y la jeringa y los voltajes están entre 10 y 13 V. Los diámetros promedio de las muestras varían entre mínimo de 0.57 μm y un máximo de 1.43 μm .

Sin embargo, en la Figura 6 se muestran microfibras de buena calidad para los parámetros establecidos en la Tabla 1. La imagen (g) muestra fibras constantes con un diámetro promedio de 0.72 μm , la imagen (h) presenta fibras constantes sin grumos con un diámetro promedio de 0.73 μm , y en la imagen (i) se observa fibras constantes, con buen entrecruzamiento con un promedio de fibras de 0.65 μm . Estas fibras fueron captadas a 20 μm en el SEM.

Figura 6

Imágenes SEM, g) M4 con 25 cm-15 Kv, h) M12 con 17,5 cm-15 Kv, i) M18 con 10 cm-13 Kv

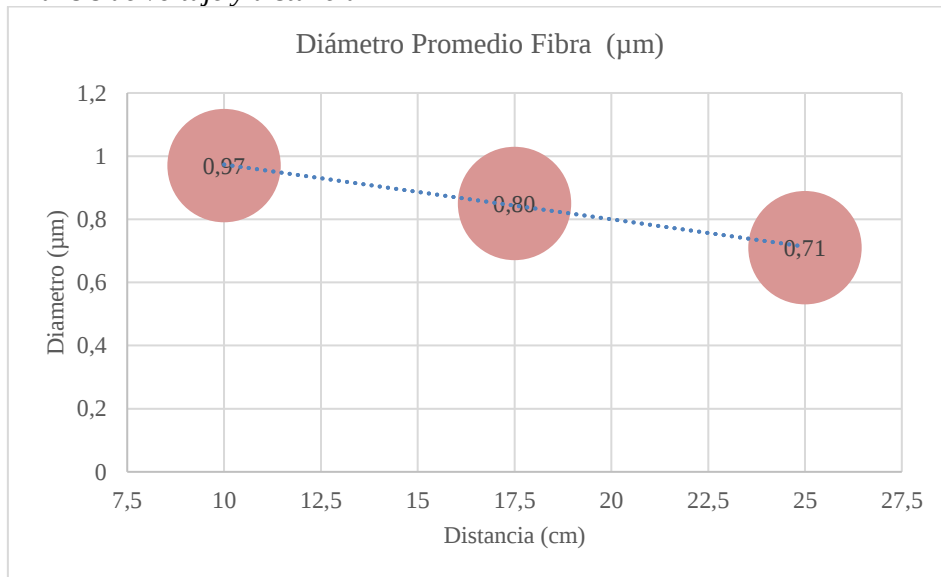


Las muestras M4, M12 y M18 son las de mejor calidad cuyos diámetros van disminuyendo a medida que se aumenta la distancia entre la aguja y el colector, además se producen con voltajes de 13 y 15 kV. Las fibras obtenidas son constantes, entrecruzadas y sin grumos. Este comportamiento es por la elevada evaporación del disolvente. Estos diámetros obtenidos son adecuados para diversas aplicaciones, como la ingeniería de tejidos, la filtración y la catálisis.

La distancia entre la aguja-colector influye el diámetro de la fibra. Por lo que en la Figura 7, se presenta una relación del parámetro distancia y el diámetro promedio de las fibras. Al aumentar la distancia entre la aguja-colector el diámetro promedio de las fibras disminuye los mismos que se representa en círculos de tamaño variable. Por lo tanto, existe una relación inversamente proporcional entre la distancia y el diámetro promedio de la fibra. Es decir, a medida que la distancia aumenta, el diámetro de la fibra tiende a disminuir.

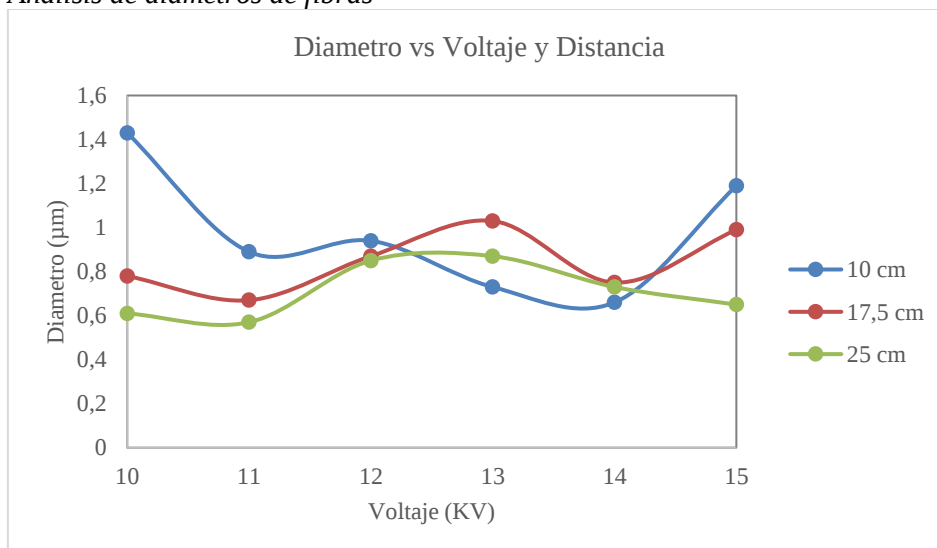
En la Figura 8, se presenta el comportamiento de los parámetros de distancia y voltaje utilizados para el electrohilado y da como resultado diámetros de tendencias no definidas, sin embargo, se puede observar que el diámetro a los 12 kV y 14 kV se aproximan sin importar la distancia de la jeringa. Se observa que a los 10 kV el diámetro del hilo disperso, conforme el voltaje se incrementa los diámetros se aproximan. Por lo tanto, la influencia del voltaje en el diámetro de la fibra depende de la distancia aguja-colector, y viceversa. Además, es necesario optimizar tanto el voltaje como la distancia para obtener fibras con el tamaño deseado.

Figura 7
Análisis de voltaje y distancia



También, en el comportamiento de las distancias, se observa para 10 cm un diámetro de la fibra comienza en un valor cercano a 1.4 µm cuando el voltaje es bajo (10 kV), disminuye a alrededor de 0.8 µm a medida que el voltaje aumenta a 12 kV, y luego aumenta de nuevo hasta 1.4 µm a 15 kV el cual no es estable. También para 17.5 cm la tendencia es más estable, el diámetro disminuye de 1.0 µm a 0.6 µm entre 10 y 12 kV, y luego vuelve a aumentar hasta aproximadamente 0.8 µm a 15 kV. Últimamente, para 25 cm el comportamiento es menos pronunciado. El diámetro sigue una tendencia más suave, disminuyendo de 0.7 µm a 0.5 µm entre 10 y 12 kV, y luego aumenta ligeramente a 0.6 µm a 15 kV.

Figura 8
Análisis de diámetros de fibras



En la Figura 9, se realizó un análisis de relación entre parámetros del proceso de electrohilado. En la relación distancia vs diámetro promedio, para 10 cm el promedio es el más alto con 0.94 µm y existe una alta variación de diámetros. En 17.5 cm el promedio es de 0.81 µm

y existe una reducción de diámetro respecto al de 10 cm y tiene una menor variabilidad. Esto indica un campo eléctrico más equilibrado, capaz de estirar las fibras de forma más uniforme. Y para 25 cm el promedio es de 0.70 μm con el menor diámetro promedio, indicando que el aumento de la distancia permite un mayor tiempo de estiramiento del chorro lo que provoca fibras más finas y uniformes.

Finalmente, se realizó un análisis de las variables de voltaje vs diámetros unitarios para las distancias indicadas en la Figura 9. Para 10 cm con un voltaje de 14 kV se obtuvo un diámetro de 0.66 μm , mostrando que el voltaje incrementa la fuerza de estiramiento y disminuye el diámetro. A los 17.5 cm de distancia y 15 kV produce un diámetro de 0.72 μm que es inferior a los 13 kV (1.03 μm), ratificando la tendencia a la disminución del diámetro a altos voltajes. Para 25 cm con voltaje de 15 kV genero el diámetro más bajo con 0.65 μm .

Figura 9
Relación de parámetros

Muestras	Distancia (cm)	Voltaje (kV)	Diámetro Unitario (μm)	Diámetro Promedio (μm)
1	10	10	1,43 ^a	0,94
4		13	0,73 ^c	
5		14	0,66 ^b	
8	17,5	11	0,67 ^b	0,81
10		13	1,03 ^a	
12		15	0,72 ^c	
14	25	11	0,57 ^b	0,70
16		13	0,87 ^a	
18		15	0,65 ^c	

^a: Fibras con diámetros mayores

^b: Fibras con diámetros menores

^c: Fibras con buenas características

DISCUSIÓN

La concentración de sustancias es importante para la obtención de fibras. (Ahmadi Bonakdar & Rodrigue, 2024) indica cuando la solución está demasiado diluida, se forman gotas individuales en lugar de fibras continuas debido a la alta tensión superficial y baja viscosidad. Con un ligero aumento en la concentración, las nanofibras se vuelven inestables, lo que resulta en una mezcla de perlas y fibras. En la concentración óptima, se producen nanofibras sin perlas. Las soluciones de polímeros con alta concentración no son adecuadas para el electrohilado debido a su elevada viscosidad. Además, se ha demostrado que aumentar la concentración de la solución conduce a un mayor diámetro de fibra. En nuestra investigación se obtuvo fibras con pequeñas gotas y grumos. Asimismo, nuestras fibras son de mayores diámetros debido a la concentración de los componentes. Por lo tanto, es importante considerar el polímero y solvente en el proceso de electrohilado.

Reneker et al. estudio el inicio de la inestabilidad de flexión durante el hilado y observaron la formación de una estructura de fibra cerrada. Esta estructura se ha observado en otros copolímeros como el fluoruro de vinilideno, el tetrafluoroetileno y la polietilazolina. El diámetro de la fibra varió de 1 μm a 1,5 μm (Subbiah et al., 2005). En nuestro experimento de polímero de polisiloxano se obtuvo diámetros de fibras mínimo de 0.57 μm y un máximo de 1.43 μm . También, en distancias reducidas (10 cm), un voltaje intermedio (13–14 kV) produce fibras de mayor grosor. No obstante, para mantener una fuerza de estiramiento adecuada a distancias extensas (25 cm), es necesario un voltaje elevado (15 kV). Esto indica que hay un balance óptimo entre voltaje y distancia para conseguir fibras de diámetros reducidos y estables.

(Ahmadi Bonakdar & Rodrigue, 2024) indico que la distancia entre el colector y la punta de la aguja se ha considerado como otro enfoque para controlar el diámetro y la morfología de la fibra debido al efecto de la distancia en la trayectoria del chorro, el tiempo de viaje y la evaporación del disolvente. En general, aumentar la distancia conduce a la formación de fibras más delgadas. En nuestro ensayo se observó que el incremento de las distancias de la aguja y el colector de 10, 17.5 y 25 cm se generó fibras con diámetros de 0.97, 0.80 y 0.71 μm respectivamente. Así también, se encontró parámetros con buenas características que destacan los puntos donde se obtuvo un buen equilibrio entre estiramiento y uniformidad de las fibras como: 13 kV a 10 cm (0,73 μm); 15 kV a 17,5 cm (0,72 μm) y 15 kV a 25 cm (0,65 μm). Por lo tanto, la disminución del diámetro de la fibra a medida que aumenta la distancia esta vinculado a un proceso físico como un efecto de condensación. Este comportamiento puede ser significativo para investigaciones en procesos de producción.

CONCLUSIONES

Se ha estudiado este polímero debido a que no se han encontrado estudios similares de la solución polimérica. Si se obtiene membranas en escala micro y nanométrica se puede aplicar como recubrimiento de frutas, aislantes de dispositivos electrónicos, área textil, entre otras; además es un producto de fácil adquisición y de bajo costo.

La propiedad física de la composición es importante en el proceso de electrohilado por ejemplo el pH ligeramente ácido puede influir en la carga superficial de las fibras durante el proceso de estiramiento. Por otro lado, cuando la viscosidad se encuentra muy diluida existirá un corte de la fibra antes de llegar al colector y al tener una concentración más densa no se podrá moldear la fibra por la alta viscosidad que se ha formado.

El voltaje es un parámetro importante en el proceso de electrohilado ya que permite obtener fibras eficientes y más delgadas, pero las fibras presentan un comportamiento no lineal en relación al voltaje. Conforme se incrementa el voltaje el diámetro de las fibras disminuye en las distancias más próximas (10 y 17.5 cm), sin embargo, en las distancias más largas (25 cm) disminuye el diámetro de forma ligera.

El aumento de la distancia entre la aguja-colector reduce el diámetro medio de las fibras. Esto ocurre porque el chorro tiene un mayor tiempo de vuelo, lo que permite una elongación más eficiente antes de la solidificación. Por otro lado, el aumento del voltaje disminuye el diámetro de la fibra, siempre y cuando no sobrepase un límite que pueda provocar inestabilidad.

Se obtuvieron microfibras de polisiloxano a escala micrométrica de 0.57 μm , de característica continua, alta porosidad. Por lo tanto, la investigación evidencia que tanto la distancia como el voltaje ejercen un impacto considerable y compartido en el diámetro de las fibras electrohiladas. Para lograr fibras consistentes y finas, en esencial modificar cuidadosamente estas variables. En las condiciones evaluadas, la aplicación de 15 kV y distancias de 17.5 a 25 cm permite obtener diámetros reducidos con excelentes propiedades morfológicas, lo que contribuye a condiciones ideales para futuras aplicaciones en materiales nanoestructurados.

Finalmente, es fundamental considerar las composiciones, las concentraciones de la solución polimérica, las condiciones ambientales, la velocidad de inyección y la velocidad de recolección del electrohilado ya que puede modificar el comportamiento y debe ser considerados para futuras investigaciones.

REFERENCIAS

- Ahmadi Bonakdar, M., & Rodrigue, D. (2024). *Electrospinning: Processes, Structures, and Materials*. Macromol, 4(1), 58–103. <https://doi.org/10.3390/macromol4010004>
- Anún, J., Bagatello, F. J., Cid, M. P., & Comín, R. (2018). *Electrohilado y obtención de nanofibras de gelatina con hidroxapatita*. Setiembre, 5(2), 43.
- Bognitzki, M., Czado, W., Frese, T., Schaper, A., Hellwig, M., Steinhart, M., Greiner, A., & Wendorff, J. H. (2001). *Nanostructured fibers via electrospinning*. Advanced Materials, 13(1), 70–72.
[https://doi.org/10.1002/1521-4095\(200101\)13:1<70::AID-ADMA70>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/1521-4095(200101)13:1<70::AID-ADMA70>3.0.CO;2-H)
- Cano, F., Tornero, J. A., & Naik, A. (2010). *Producción de nanofibras a partir de un diseño innovador de máquina prototipo de electrospinning*. Boletín Intexter Del Instituto de Investigación Textil y de Cooperación Industrial, 136, 5–21.
- Directiva, J., & Adjuntos, E. (2004). Lástica y.
- El-hadi, A. M., & Al-Jabri, F. Y. (2016). *Influence of electrospinning parameters on fiber diameter and mechanical properties of poly(3-Hydroxybutyrate) (PHB) and polyanilines (PANI) blends*. Polymers, 8(3). <https://doi.org/10.3390/polym8030097>
- Feng, C., Khulbe, K. C., Matsuura, T., Tabe, S., & Ismail, A. F. (2013). *Preparation and characterization of electro-spun nanofiber membranes and their possible applications in water treatment*. Separation and Purification Technology, 102, 118–135.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.09.037>
- Frey, M. W. (2008). *Electrospinning cellulose and cellulose derivatives*. Polymer Reviews, 48(2), 378–391. <https://doi.org/10.1080/15583720802022281>
- Jacobs, C. R., & Kelly, D. J. (2011). *Advances on Modeling in Tissue Engineering*. 20, 1–14.
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-1254-6>
- Jagadeesh Babu, V., Pavan Kumar, V. S., Sundaray, B., Murthy, V. R. K., & Natarjan, T. S. (2007). *Preparation and characterization of electrospun nanofibers of Nylon-6 doped with copper(II) chloride*. Materials Science and Engineering: B, 142(1), 46–50.
<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.06.007>
- Manuel, O.-G., Ricardo, A.-H. J., & Tetyana, K. (2013). *Procesamiento de micro y nanofibras de polipirrol/óxido de polietileno/nylon-6 por la técnica de electrohilado***Citación estilo Chicago Olvera-Gracia, Manuel, Jorge Ricardo Aguilar-Hernández, Tetyana Kryshtab. Procesamiento de micro y nanofibras de polipi. Ingeniería, Investigación y Tecnología, 14(4), 575–581. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(13\)72267-4](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(13)72267-4)
- MARK, J. E. (2005). *Polímeros inorgánicos*.
- Membranes, F., & Materials, F. (2024). *Influence of Electrospinning Parameters on the Morphology of Filtration Materials*.

- Moghe, A. K., & Gupta, B. S. (2008). *Co-axial electrospinning for nanofiber structures: Preparation and applications*. Polymer Reviews, 48(2), 353–377.
<https://doi.org/10.1080/15583720802022257>
- Nakano, A., Miki, N., Hishida, K., & Hotta, A. (2012). *Solution parameters for the fabrication of thinner silicone fibers by electrospinning*. Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 86(1), 1–9. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.86.011801>
- Principal, A. (2013). *Síntesis y Caracterización de un Polisiloxano Funcionalizado : Estudio de sus Propiedades en un Disolvente Polar*. 2, 22–26.
- Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W., Lim, T., Ma, Z., Reneker, D. H., & Chun, I. (1996). *Chapter 1 - Introduction*. Nanotechnology, 7(3), 1–21. <http://stacks.iop.org/0957-4484/7/i=3/a=009?key=crossref.b62a3c509c723c5a2561f1e345fc1706>
- Robles-García, M. A., Francisco, R.-F., Márquez-Ríos, E., Barrera-Rodríguez, A., Aguilar-Martínez, J., & Del toro-Sánchez, C. L. (2014). *Aplicaciones Biomédicas, Textiles Y Alimentarias De Nanoestructuras Elaboradas Por Electrohilado*. BIOtecnia, 16(2), 44.
<https://doi.org/10.18633/bt.v16i2.46>
- Ruiz, K. (2015). *Universidad Técnica de Ambato Universidad Técnica de Ambato. Repositorio Institucional de La Universidad Técnica de Ambato*, 593(03), 119.
<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/12640>
- Special, N., Development, W., & Beach, V. (2010). *T He E Ffect of P Osition on the P Ercentage of. Strength And Conditioning*, 0(0), 1–7.
- Su, C. I., Lai, T. C., Lu, C. H., Liu, Y. S., & Wu, S. P. (2013). *Yarn formation of nanofibers prepared using electrospinning*. Fibers and Polymers, 14(4), 542–549.
<https://doi.org/10.1007/s12221-013-0542-4>
- Subbiah, T., Bhat, G. S., Tock, R. W., Parameswaran, S., & Ramkumar, S. S. (2005). *Electrospinning of nanofibers*. Journal of Applied Polymer Science, 96(2), 557–569.
<https://doi.org/10.1002/app.21481>
- Xue, J., Wu, T., Dai, Y., & Xia, Y. (2019). *Electrospinning and electrospun nanofibers: Methods, materials, and applications*. Chemical Reviews, 119(8), 5298–5415.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00593>