

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería



**“Nanocompuesto de quitosano-platino obtenido por electrohilado coaxial
con potencial uso en la regeneración de tejido nervioso”**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

INGENIERO EN NANOTECNOLOGÍA

Presenta:

Alfonso Martínez León.

Dirigido por:

Dr. José Alberto Rodríguez Morales.

Santiago de Querétaro, Qro.

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



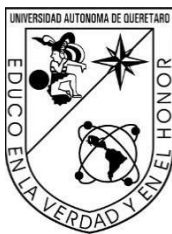
SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

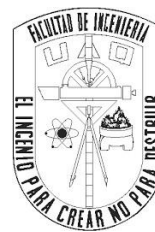
Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería



“Nanocompuesto de quitosano-platino obtenido por electrohilado coaxial con potencial uso en la regeneración de tejido nervioso”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

INGENIERO EN NANOTECNOLOGÍA

Presenta

Alfonso Martínez León

Dirigido por:

Dr. José Alberto Rodríguez Morales

Dr. José Alberto Rodríguez Morales
Presidente

Firma

Dra. Adriana Jheny Rodríguez Méndez
Secretario

Firma

Dr. Luis Alejandro Martínez Chávez
Vocal

Firma

M. C. José Alberto Isidoro Olvera Rodríguez
Suplente

Firma

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Febrero, 2026.

México.

AGRADECIMIENTOS

Al culminar esta etapa tan significativa en mi formación profesional y personal, quiero dedicar un espacio especial a agradecer profundamente a todas aquellas personas e instituciones que me acompañaron, impulsaron y brindaron su apoyo incondicional a lo largo de este proceso.

En primer lugar, agradezco con todo mi corazón a mi padre, cuyo ejemplo, dedicación y esfuerzo constante han sido fuente de inspiración para no rendirme y seguir adelante. Su apoyo constante, sus grandes esfuerzos por darnos las facilidades y posibilidades que me han traído hasta donde estoy; su confianza en mí han sido un pilar fundamental que me ha sostenido en cada paso de este camino. A mi familia, por estar presente, por brindarme apoyo, seguridad y un hogar en el que encontré fortaleza. Agradezco cada gesto, cada palabra y cada acto de cariño que me ha ayudado a mantenerme firme, incluso en los momentos de incertidumbre. A mi asesor de tesis, por su acompañamiento académico, por su orientación precisa, por su disposición constante y por compartir su experiencia y conocimiento de manera generosa. Su guía fue clave para dar forma y solidez a este trabajo, y su compromiso ha dejado una huella profunda en mi formación.

Quiero también extender mi agradecimiento a los integrantes del sínodo, por dedicar su tiempo a la lectura y evaluación de este proyecto, y por sus valiosas observaciones, que enriquecieron su contenido y aportaron una perspectiva crítica fundamental.

Agradezco al coordinador de la carrera de Ingeniería en Nanotecnología, por su gestión, por facilitar los recursos necesarios y por velar por el correcto desarrollo académico de los estudiantes. Su labor silenciosa pero esencial ha contribuido a que muchos de nosotros podamos culminar esta etapa con éxito.

A todas aquellas personas que han estado ahí para apoyarme de todas las maneras

posibles —familiares, amigos, compañeros, docentes— en los momentos en que más los necesité, les agradezco desde lo más profundo de mi ser. Su presencia, sus consejos, su compañía y su apoyo han sido un sostén invaluable, un refugio en medio del cansancio, la duda o la presión. Ustedes han representado un respaldo emocional y humano que va más allá de las palabras, y cuyo valor no puede medirse ni compararse.

Mi más sincero agradecimiento a Proco bi, por brindarme la oportunidad de desarrollarme en un entorno profesional estimulante, por confiar en mis capacidades, y por ofrecerme las herramientas y el espacio necesario para llevar a cabo pruebas bacteriológicas que fueron parte importante de este proyecto. La experiencia adquirida durante mi estancia allí ha ampliado mi perspectiva y reforzado mi compromiso con la ciencia y la innovación.

Finalmente, a la **Universidad Autónoma de Querétaro**, que ha sido mi casa de estudios desde la preparatoria, le agradezco por haberme abierto las puertas al conocimiento, al pensamiento crítico y a una formación integral. Esta institución no solo me proporcionó las bases académicas necesarias, sino también un entorno de crecimiento humano, intelectual y profesional que marcará para siempre mi vida.

A todos quienes formaron parte de este trayecto, directa o indirectamente, gracias.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN.....	7
ABSTRACT	9
1 CAPÍTULO I: Antecedentes.....	11
2 CAPÍTULO II: Marco teórico	14
2.1 Nanotecnología.....	14
2.2 Síntesis de nanomateriales.....	15
2.3 Clasificación de los nanomateriales	17
2.3.1 Clasificación por dimensionalidad	17
2.3.2 Clasificación por morfología	18
2.3.3 Clasificación por estado físico	18
2.3.4 Clasificación por composición química.....	18
2.4 Nanocompuesto	18
2.4.1 Características de los nanocompuestos	20
2.4.2 Aplicaciones de nanocompuestos	20
2.5 Quitosano	21
2.5.1 Origen y extracción	23
2.5.2 Estructuras con quitosano	25
2.5.3 Aplicaciones	25
2.5.4 Quitosano y la Nanotecnología	26
2.6 Platino	27
2.6.1 Origen.....	28
2.6.2 Usos	28
2.6.3 Potencial regenerativo	29
2.7 Técnica de electrohilado	31
2.7.1 Fundamento de método	31
2.7.2 Electrohilado coaxial	33
2.7.3 Electrohilado de quitosano	34
2.8 Sistema nervioso.....	35
2.8.1 Sistema nervioso Central.....	36

2.8.2	Sistema nervioso periférico.....	36
2.8.3	Tejido nervioso	37
2.8.4	Conformación del tejido nervioso	38
2.8.4.1	Neuronas	38
2.8.4.2	Células gliales	39
2.8.4.3	Fibras	40
2.8.5	Sinapsis	41
2.8.6	Mecanismos de regeneración	41
3	Capítulo III: Justificación	42
4	Capítulo IV: Descripción del problema	44
5	Capítulo V: Hipótesis	45
6	Capítulo VI: Objetivos	45
6.1	Objetivo General	45
6.2	Objetivos específicos	45
7	Capítulo VII: Cronograma de actividadesTabla 1. Cronograma de actividades.	45
8	Capítulo VIII: Metodología	46
8.1	Materiales.....	46
8.2	Síntesis de Quitosano-GMA	46
8.3	Síntesis de nanopartículas de platino.....	47
8.4	Preparación de las soluciones para electrohilar: PVA y quitosano-npt.....	48
8.5	Parámetros del electrohilado coaxial	49
8.6	Pruebas de Hinchamiento	49
8.7	Prueba de Degradación	50
8.8	Actividad antimicrobiana	50
9	Capítulo IX: Resultados y Discusión	51
9.1	Obtención de fibras de quitosano-GMA.....	51
9.2	Síntesis de nanopartículas de platino.....	52
9.3	Formación del solución de quitosano_GMA-npPt para electrohilar	52
9.4	Modificación del sistema coaxial	53
9.5	Espectroscopía del espectro infrarrojo (IR) de las fibras de quitosano	53
9.6	Espectroscopía UV-vis de las nanopartículas de platino	55
9.7	Difracción de luz dinámica	56
9.8	Espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF)	57

9.9	Análisis de pruebas de hinchamiento.....	58
9.10	Análisis de pruebas de degradación.....	60
9.11	Microscopia optica de las membranas.....	62
9.12	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	63
9.13	Análisis de actividad antimicrobiana.....	64
10	Capítulo X: Conclusiones	67
11	Capítulo XI: Perspectivas Futuras	71
12	Capítulo XII: Referencias bibliográficas.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los nanomateriales en base a diferentes criterios (Gupta,2025)..	17
Figura 2. Diagrama estructural de las fases componentes de un material compuesto (Propia autoría, generado mediante Biorender.com).....	19
Figura 3. Estructura molecular del Quitosano (De Mara Aguiar Carvalho et al., 2025).....	23
Figura 4. Diagrama general del equipo de electrohilado (Propia autoría, generado mediante Biorender.com)	31
Figura 5. Diagrama del sistema para electrohilado coaxial de doble bomba (Propia autoría, generado mediante Biorender.com)	33
Figura 6. Diagrama del proceso de Metacrilación de quitosano y precipitación en acetonitrilo (Propia autoría, generado mediante Biorender.com).	47
Figura 7. Diagrama de preparación de soluciones para electrohilar: A) Solución de PVA y B) Solución de quitosano, fibras de quitosano metacrilato y nanopartículas de platino (Propia autoría, generado mediante Biorender.com).	48
Figura 8. Diagrama del equipo de electrohilado coaxial con recolector fijo (Propia autoría, generado mediante Biorender.com).	49
Figura 9. Imágenes del proceso de Metacrilación del quitosano: A) Recolección de fibras en acetonitrilo, B) Fibras de quitosano-GMA en frasco ámbar para almacenar, C) Agitación de soluciones de quitosano y D) Precipitado de fibras metacriladas (Propia autoría)....	51
Figura 10. Imágenes del proceso de síntesis de nanopartículas de platino: A) Reducción de dinitrofosfatoplatinato con borohidruro de sodio, B) Sedimento de nanopartículas de platino y C) Solución con nanopartículas dispersas (Propia autoría).	52
Figura 11. imágenes de la formación de soluciones de quitosano con npPt y quitosano_GMA para electrohilar: A) Solución con relación 4:1 y B) Solución con relación 2:1(Propia autoría).	52
Figura 12. Modelo 3D para el acople del sistema coaxial: A) Vista frontal y B) Vista lateral (Propia autoría, generado mediante autodesk fusion 360).	53
Figura 13. Espectroscopía del espectro infrarrojo correspondientes al rango de 4000 a 500 cm ⁻¹ , resaltando las señales obtenidas en la muestra de quitosano.	54
Figura 14. Espectroscopía UV-vis de las nanopartículas de platino.	55
Figura 15. Grafica de distribución de tamaño de nanopartículas de platino en solución obtenida mediante dispersión de luz dinámica.	57
Figura 16. Análisis elemental por XRF de las nanopartículas de platino.	58
Figura 17. Porcentaje de hinchamiento de membranas electrohiladas desde 0 a 24 horas..	59
Figura 18. Porcentaje de hinchamiento de membranas electrohiladas de 0 a 1 hora.....	60
Figura 19. Porcentaje de degradación de membranas electrohiladas desde 0 a 7 días.....	61
Figura 20. Imagen de membrana electrohilada obtenida mediante Microscopía óptica a 100x.	62
Figura 21. Micrografía MEB de la membrana electrohilada con ampliación 100,00x.	63
Figura 22. Micrografía MEB de la membrana electrohilada con ampliación 1,000x.	64
Figura 23. Muestras control de las diluciones de las membranas con nanopartículas y sin nanopartículas.	64
Figura 24. Muestras control de diluciones de dispersión de nanopartículas de platino.	65

Figura 25. Gráfica de crecimiento del halo en prueba de actividad microbiana.	66
Figura 26. imágenes del crecimiento de <i>Bacillus subtilis</i> en: A) Control sin material y B) Dilución de membrana.	67

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo VII: Cronograma de actividades	Tabla 1. Cronograma de actividades.....	45
---	---	----

RESUMEN

Las lesiones del tejido nervioso representan un problema de salud pública creciente debido al alza en su incidencia, la gravedad y las repercusiones a largo plazo. Este tipo de lesiones, causadas por traumatismos, enfermedades neurodegenerativas, accidentes cerebrovasculares o condiciones patológicas que afecten de forma directa el sistema nervioso afectan a millones de personas. Las consecuencias son la pérdida de movilidad, trastornos cognitivos, dolor crónico y dependencia funcional, lo que impacta directamente en la calidad de vida del paciente y su entorno. Además, generan una elevada carga económica para los sistemas de salud por la necesidad de tratamientos prolongados, rehabilitación y cuidados especializados. A pesar de los avances médicos, aún no existen terapias regenerativas completamente efectivas, y muchas personas viven con discapacidades permanentes.

El presente proyecto se centra en el desarrollo de una membrana de quitosano modificada con ácido glicidil metacrílico (GMA), la cual es procesada mediante electrohilado coaxial utilizando polivinil alcohol (PVA) como núcleo. Dentro de la matriz de quitosano se incorporan nanopartículas de platino (npPt), distribuidas de manera uniforme en la estructura del material. Este enfoque busca mejorar las propiedades mecánicas, químicas y biológicas del material, con la finalidad de que pueda ser aplicado en el campo de la ingeniería de tejidos.

El objetivo principal de la investigación es la síntesis de membranas de quitosano electrohiladas coaxialmente con núcleo de alcohol polivinílico y nanopartículas de platino en la matriz de quitosano. Dicho material presenta un gran potencial para aplicaciones en biomedicina y regeneración neuronal, debido a su capacidad para proporcionar un microambiente favorable para el crecimiento celular y la diferenciación de tejidos específicos.

Para la fabricación de estas fibras se utiliza la técnica de electrohilado coaxial el cual es un método altamente eficiente que permite obtener fibras con diámetros nanométricos, asegurando una estructura uniforme y continua. La incorporación de nanopartículas de platino en la matriz de quitosano permite una distribución homogénea, lo que garantiza una mejor interacción con el entorno biológico. Además, el uso del núcleo de PVA facilita el procesamiento de las fibras y contribuye a su estabilidad estructural.

Este estudio representa una contribución significativa en el desarrollo de materiales avanzados para la regeneración de tejidos, abriendo nuevas posibilidades en el diseño de biomateriales con propiedades mejoradas para aplicaciones en medicina regenerativa.

Palabras clave: quitosano, nanopartículas de platino, electrohilado coaxial, biomateriales, regeneración.

ABSTRACT

Nerve tissue injuries represent a growing public health problem due to their increasing incidence, severity and long-term repercussions. These types of injuries, caused by trauma, neurodegenerative diseases, stroke or pathological conditions directly affecting the nervous system, affect millions of people, resulting in loss of mobility, cognitive disorders, chronic pain and functional dependence, which directly impact the quality of life of the patient and his or her environment. In addition, they generate a high economic burden for healthcare systems due to the need for prolonged treatment, rehabilitation and specialized care. Despite medical advances, there are still no fully effective regenerative therapies, and many people live with permanent disabilities.

The present project focuses on the development of a glycidyl methacrylic acid (GMA)-modified chitosan film, which is processed by coaxial electrospinning using polyvinyl alcohol (PVA) as the core. Platinum nanoparticles (npPt) are incorporated into the chitosan matrix, uniformly distributed in the material structure. This approach seeks to improve the mechanical, chemical and biological properties of the material, so that it can be applied in the field of tissue engineering.

The main objective of the research is the synthesis of coaxially electrospun chitosan films with a polyvinyl alcohol core and platinum nanoparticles in the chitosan matrix. This material has great potential for applications in biomedicine and neural regeneration, due to its ability to provide a favorable microenvironment for cell growth and the differentiation of specific tissues.

For the fabrication of these fibers, the coaxial electrospinning technique is used, a highly efficient method that allows obtaining fibers with nanometric diameters, ensuring a uniform and continuous structure. The incorporation of platinum nanoparticles in the chitosan matrix allows a homogeneous distribution, which guarantees a better interaction with the biological environment. In addition, the use

of the PVA core facilitates the processing of the fibers and contributes to their structural stability.

This study represents a significant contribution in the development of advanced materials for tissue regeneration, opening new possibilities in the design of biomaterials with improved properties for applications in regenerative medicine.

Keywords: chitosan, platinum nanoparticles, coaxial electrospinning, biomaterials, regeneration.

1 CAPÍTULO I: ANTECEDENTES

El sistema nervioso constituye uno de los sistemas más complejos y especializados del organismo humano, ya que es el encargado de coordinar, regular e integrar las funciones fisiológicas esenciales que permiten la adaptación y supervivencia del individuo frente a estímulos internos y externos. Desde el punto de vista anatómico y funcional, el sistema nervioso se divide en dos grandes componentes: el sistema nervioso central y el sistema nervioso periférico. El sistema nervioso central está conformado por el encéfalo y la médula espinal, estructuras responsables del procesamiento de la información sensorial, la generación de respuestas motoras y el control de funciones vitales. Por su parte, el sistema nervioso periférico está constituido por una extensa red de nervios y ganglios que se distribuyen a lo largo del cuerpo, permitiendo la comunicación entre el sistema nervioso central y los diferentes órganos, tejidos y sistemas, lo que resulta indispensable para el mantenimiento de la homeostasis (Wang et al., 2025).

Las lesiones del sistema nervioso periférico representan un problema clínico de gran relevancia debido a su alta incidencia y a las consecuencias funcionales que pueden generar. Estas lesiones se presentan con mayor frecuencia en comparación con las del sistema nervioso central, principalmente porque los nervios periféricos se encuentran más expuestos a factores externos como traumatismos, laceraciones, accidentes, procedimientos quirúrgicos, enfermedades metabólicas y exposición a sustancias tóxicas. El daño a los nervios periféricos puede ocasionar alteraciones sensoriales, motoras y autonómicas, lo que puede derivar en discapacidades temporales o permanentes, afectando de manera significativa la calidad de vida, la autonomía y la capacidad productiva del individuo (Winter et al., 2016).

A lo largo de los años, se han desarrollado diversas estrategias terapéuticas para el tratamiento de las lesiones del sistema nervioso periférico, entre las que se incluyen enfoques farmacológicos, ortopédicos y quirúrgicos, así como terapias basadas en la medicina tradicional. No obstante, estos métodos presentan limitaciones importantes, como una recuperación funcional incompleta, largos periodos de rehabilitación y resultados variables dependiendo del grado y tipo de lesión.

En este contexto, la ingeniería de tejidos ha surgido como una alternativa prometedora, enfocándose en el desarrollo de biomateriales capaces de favorecer la regeneración del tejido nervioso mediante la recreación de un microambiente adecuado para el crecimiento celular (Yang et al., 2024).

El avance de la nanociencia y la aplicación de la nanomedicina han impulsado de manera significativa el desarrollo de nuevas estrategias para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades y lesiones neurológicas. La incorporación de nanomateriales en la ingeniería de tejidos ha permitido la creación de estructuras con propiedades fisicoquímicas y biológicas mejoradas, tales como una mayor área de superficie específica, porosidad controlada y capacidad de interacción a escala nanométrica con las células. Estas características resultan fundamentales para promover procesos como la adhesión, proliferación y diferenciación celular, especialmente en microambientes patológicos complejos, donde las condiciones fisiológicas se encuentran alteradas (Zhang et al., 2025).

Dentro de este campo, los nanomateriales utilizados como andamios tridimensionales han demostrado un gran potencial para la regeneración del tejido nervioso, ya que pueden imitar de manera más precisa la arquitectura de la matriz extracelular natural. En comparación con las técnicas tradicionales, los andamios nanofibrosos ofrecen ventajas significativas, incluyendo una mejor orientación del crecimiento axonal, mayor interacción célula-material y una respuesta biológica más favorable. Estas propiedades hacen que los nanomateriales sean particularmente atractivos para aplicaciones en la reparación de nervios periféricos (Zhang et al., 2025).

Entre los biomateriales más estudiados en ingeniería de tejidos destaca el quitosano, un polisacárido natural derivado de la desacetilación de la quitina, el cual presenta propiedades de biocompatibilidad, biodegradabilidad, bioactividad y baja toxicidad. El quitosano ha sido ampliamente utilizado en el área médica para aplicaciones como la regeneración celular, la cicatrización de heridas y la administración controlada de fármacos, empleándose en diversas formas, incluyendo membranas, hidrogeles y andamios. Sin embargo, a pesar de sus

ventajas, el quitosano presenta limitaciones durante su procesamiento mediante técnicas como el electrohilado, debido a la alta viscosidad y densidad de sus soluciones, lo que puede dar lugar a defectos estructurales, como la formación de microesferas en lugar de fibras continuas y uniformes (Ellis-Behnke, 2007).

Con el fin de superar estas limitaciones, se ha propuesto la combinación del quitosano con otros polímeros, como el alcohol polivinílico, mediante técnicas avanzadas de fabricación. El electrohilado coaxial se presenta como una estrategia eficaz para la obtención de nanofibras con estructura de núcleo y cubierta, permitiendo mejorar la estabilidad del proceso y la calidad morfológica de las fibras. Esta técnica posibilita la integración de distintos materiales en una sola estructura, conservando las propiedades bioactivas del quitosano y mejorando sus características mecánicas y de procesabilidad (Raihan et al., 2025).

Adicionalmente, la incorporación de nanopartículas metálicas, como las nanopartículas de platino, en matrices poliméricas ha despertado un creciente interés debido a sus propiedades antibacterianas y antioxidantes, las cuales resultan particularmente relevantes en procesos de regeneración tisular. Estas propiedades pueden contribuir a la reducción del estrés oxidativo y la prevención de infecciones, factores que suelen comprometer la regeneración del tejido nervioso. La combinación de quitosano con nanopartículas de platino en un sistema nanofibroso representa, por tanto, una alternativa innovadora para el desarrollo de andamios con funcionalidad mejorada (Waliaveetil & Anila, 2025).

En este contexto, la presente tesis propone la síntesis de un nanocompuesto de quitosano–platino mediante la técnica de electrohilado coaxial, con el objetivo de desarrollar un material con una amplia área de superficie específica, estructura nanofibrosa homogénea y propiedades bioactivas adecuadas para su aplicación como andamio en la regeneración de tejido nervioso.

2 CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 NANOTECNOLOGÍA

La nanotecnología es una disciplina multidisciplinaria que involucra la manipulación de la materia a escala nanométrica, es decir, en dimensiones que van aproximadamente de 1 a 100 nanómetros. Su objetivo principal es modificar o aprovechar las propiedades únicas que los materiales presentan a esta escala, propiedades que no suelen observarse en su estado macroscópico convencional.

Estas propiedades especiales de los nanomateriales no solo se deben a su composición química, sino también a su estructura espacial y a la alta relación superficie-volumen, lo que incrementa notablemente su reactividad, interacción con otras sustancias y, en muchos casos, sus propiedades ópticas, eléctricas o mecánicas (Singh et al., 2025).

Aunque la nanotecnología como ciencia formal es relativamente reciente, sus aplicaciones más primitivas pueden rastrearse en la antigüedad. Un ejemplo notable es el caso del acero Wootz, originario de la India alrededor del año 600 a.C., donde se ha descubierto la presencia de nanocompuestos de carbono y nanocables de cementita en su microestructura. Estos vestigios son evidencia de que los efectos nanométricos ya existían, aunque fueran desconocidos para sus creadores (Singh et al., 2025).

Sin embargo, el punto de partida teórico moderno de la nanotecnología se remonta a la icónica conferencia del físico Richard Feynman en 1959, titulada *“There’s Plenty of Room at the Bottom”*. En ella, Feynman planteó la posibilidad de manipular átomos y moléculas de manera directa, anticipando una revolución tecnológica basada en el control de la materia a escalas minúsculas (Singh et al., 2025).

El término “nanotecnología” fue acuñado formalmente por el científico japonés Norio Taniguchi en su artículo de 1974 titulado *“On the Basic Concept of Nano-Technology”*. Taniguchi definió la nanotecnología como el procesamiento de materiales mediante separación, consolidación y deformación a nivel atómico o

molecular. Esta definición sentó las bases para el desarrollo posterior de la disciplina, integrando conceptos de física, química, ciencia de materiales e ingeniería (Zhu et al., 2021).

Hoy en día, la nanotecnología se define como la ciencia, ingeniería y aplicación tecnológica de sistemas y materiales cuyas estructuras poseen al menos una dimensión dentro del rango de 1 a 100 nanómetros (Zhu et al., 2021). Esta definición es ampliamente aceptada por organismos internacionales como la ISO y por la comunidad científica en general.

2.2 SÍNTESIS DE NANOMATERIALES

Existen diversos métodos de síntesis de nanopartículas mediante los cuales es posible obtener nanocompuestos, ya sea integrando la fase nanométrica en la matriz del material o empleándola como refuerzo. Estos métodos permiten diseñar materiales con propiedades avanzadas al manipular sus componentes a escala nanométrica, donde emergen comportamientos físicos y químicos únicos. Para la formación de nanocompuestos, es fundamental considerar aspectos como la forma, tamaño y distribución del nanorefuerto, así como su interacción con la matriz y su fracción volumétrica dentro del compuesto. A partir de estas consideraciones, los métodos de síntesis se dividen en dos grandes enfoques: top-down y bottom-up, a los que se suman los métodos híbridos como alternativa complementaria (Alzahrani et al., 2025).

El enfoque top-down consiste en reducir el tamaño de materiales macroscópicos o microscópicos hasta alcanzar dimensiones nanométricas. En este método, se parte de estructuras ya formadas que son fragmentadas mediante procesos físicos. Algunas de las técnicas más representativas de este enfoque son la molienda mecánica de alta energía, que utiliza molinos de bolas para romper partículas y alcanzar tamaños inferiores a 100 nm; la litografía, especialmente utilizada en la fabricación de dispositivos electrónicos para generar patrones a escala nanométrica; y la ablación por láser, en la cual un láser de alta intensidad elimina material de una superficie para formar nanopartículas. Aunque estos métodos

permiten la producción de grandes volúmenes, presentan desafíos en el control preciso del tamaño y la forma de las partículas, y pueden generar productos con distribución irregular (Alzahrani et al., 2025).

Por otro lado, el enfoque bottom-up parte de unidades básicas como átomos o moléculas que se organizan espontáneamente para formar estructuras ordenadas a escala nanométrica. Este enfoque permite un mayor control sobre las propiedades estructurales y químicas de los nanomateriales, lo cual es crucial para su funcionalidad dentro del nanocompuesto. Algunos métodos comunes en esta categoría incluyen el proceso sol-gel, donde se produce una red sólida (gel) a partir de una solución precursora, permitiendo la incorporación uniforme de nanopartículas en una matriz; la coprecipitación, que implica la formación de partículas mediante la precipitación simultánea de diferentes iones desde una solución acuosa; la síntesis hidrotermal, que se lleva a cabo en condiciones de alta temperatura y presión en un medio acuoso; y la síntesis solvotermal, similar a la anterior pero utilizando disolventes no acuosos para favorecer la formación de nanomateriales con propiedades específicas. Estos métodos son ampliamente utilizados debido a su versatilidad, su capacidad de producir materiales con estructuras bien definidas y su aplicabilidad en matrices tanto poliméricas como cerámicas y metálicas (Aulia et al., 2025).

Adicionalmente, se han desarrollado métodos híbridos que combinan elementos de los enfoques top-down y bottom-up o emplean fuentes externas de energía para optimizar la síntesis. Un ejemplo destacado son los procesos asistidos por microondas, los cuales permiten una rápida transferencia de energía al medio de reacción, reduciendo significativamente los tiempos de síntesis y favoreciendo la formación de partículas más homogéneas. También se utilizan procesos asistidos por ultrasonido, que generan cavitación acústica, mejorando la dispersión de las nanopartículas en la matriz y favoreciendo reacciones químicas más eficientes (Aulia et al., 2025).

La elección del método de síntesis más adecuado depende de múltiples factores, como el tipo de nanomaterial deseado, las propiedades específicas que se buscan

potenciar en el compuesto, la compatibilidad con la matriz seleccionada y la viabilidad técnica y económica del proceso (Aulia et al., 2025).

2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS NANOMATERIALES

Los nanomateriales son una clase de materiales en la cual al menos una de sus dimensiones se encuentra en el rango nanométrico. En estas escalas los materiales presentan propiedades distintas a las de sus formas macroscópicas por lo que pueden ser utilizados en una gran variedad de aplicaciones. Por esto la clasificación de los nanomateriales es esencial para comprender su comportamiento y sus posibles aplicaciones. Esta clasificación puede realizarse tomando en cuenta diferentes criterios, ya que los nanomateriales pueden agruparse según su tamaño, morfología, dimensionalidad, origen y propiedades fisicoquímicas, como se muestra en la figura 1, estas clasificaciones a su vez se dividen en subgrupos dependiendo de los criterios de la clasificación (Gupta, 2025).

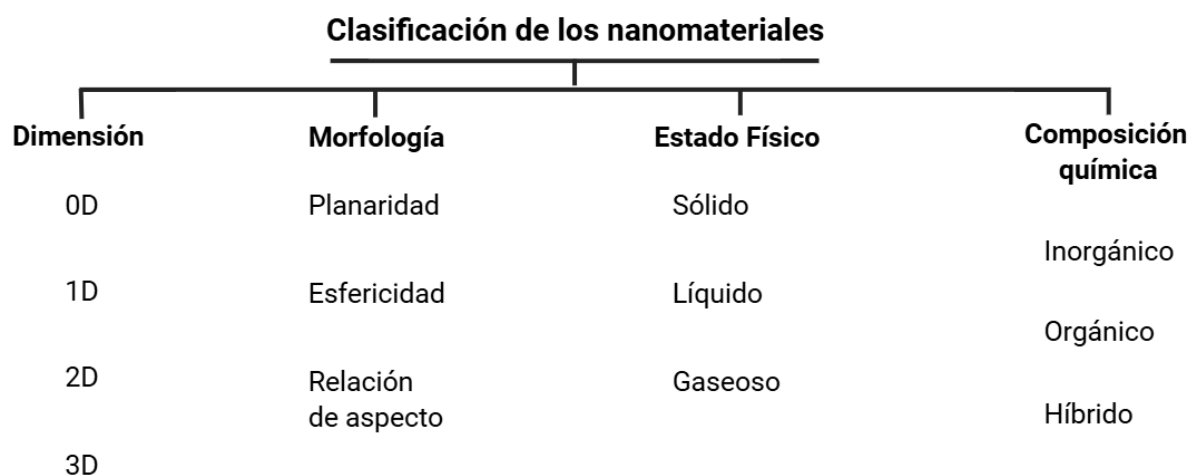


Figura 1. Clasificación de los nanomateriales en base a diferentes criterios (Gupta,2025).

2.3.1 Clasificación por dimensionalidad

En esta categoría, los materiales se dividen según el tamaño de las dimensiones constituyentes. Los materiales con dimensión cero son aquellos cuyas tres dimensiones espaciales son menores a 100nm. Cuando el material cuenta con dos dimensiones espaciales en el rango de 1nm a 100 nm se consideran unidimensionales. Por otro lado, al tener solamente una dimensión en escala nanométrica se considera un material bidimensional. Por último, los materiales

tridimensionales son aquellos constituidos por arreglos de diferentes nano-cristales combinados en diferentes direcciones (Saleh, 2020).

2.3.2 Clasificación por morfología

Esta clasificación diferencia los materiales según su forma geométrica y estructura espacial que se presenta a escala nanométrica, ya que la morfología influye directamente en las propiedades de los nanomateriales. Pueden presentarse morfologías esféricas, fibrosas, laminares, reticulares o porosas y materiales con morfologías complejas siendo una combinación de morfologías (Sudha et al., 2018).

2.3.3 Clasificación por estado físico

Esta clasificación se basa en la forma en la que el material se encuentra en condiciones de temperatura y presión normal, lo que es relevante ya que el estado físico depende del método de síntesis, la manipulación del material y su aplicación final. Estos pueden estar en estado sólido ya sea en forma de nanopartículas, polvos, nanofibras, entre otras estructuras; también pueden estar en estado líquido formando una solución con el material disperso; finalmente, en estado gaseoso pueden formar aerosoles o una suspensión en fase gaseosa (Anjum et al., 2023).

2.3.4 Clasificación por composición química

La clasificación por composición química se basa en los elementos constituyentes del material, esta clasificación se subdivide a su vez en: inorgánicos, orgánicos e híbridos, los cuales a su vez se forman por carbono, polímeros, metales, óxidos, semiconductores y la combinación de varios componentes orgánicos e inorgánicos en una estructura que integra sus propiedades. (Li & Yu, 2023)

2.4 NANOCOMPUESTO

Un compuesto es un material que resulta de la combinación física de dos o más componentes con propiedades distintas, los cuales al unirse dan lugar a un nuevo material con características mejoradas o combinadas respecto a las de sus componentes individuales. Esta combinación no es meramente aditiva; en muchos casos, el compuesto exhibe propiedades que no están presentes en ninguno de sus constituyentes por separado. Este fenómeno se conoce como efecto sinérgico (Logakannan et al., 2025).

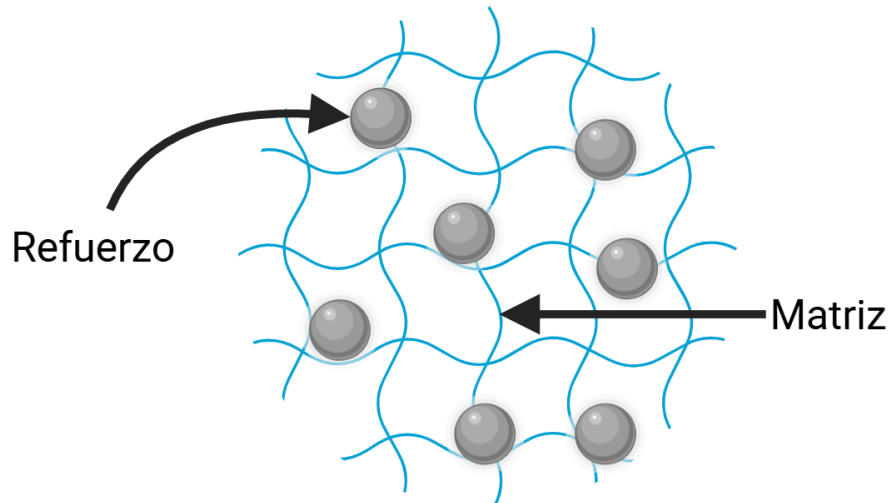


Figura 2. Diagrama estructural de las fases componentes de un material compuesto (Propia autoría, generado mediante Biorender.com).

Los compuestos son ampliamente utilizados en diferentes sectores industriales debido a su versatilidad. Se pueden encontrar en áreas tan variadas como la aeronáutica, la industria automotriz, construcción, energías renovables y el campo biomédico, donde se aprovechan sus propiedades mecánicas mejoradas, su resistencia química o térmica, su bajo peso, entre otras ventajas (Logakannan et al., 2025).

Desde el punto de vista estructural, los compuestos se componen principalmente de dos fases:

1. La matriz: es la fase continua, que forma la estructura principal del material. Su función es mantener unidas las otras fases y transferir esfuerzos mecánicos.
2. El refuerzo: es la fase dispersa, generalmente de mayor resistencia, que se incorpora a la matriz para mejorar sus propiedades. Dependiendo de la naturaleza del refuerzo (fibroso, particulado, laminar), se puede modificar significativamente el comportamiento mecánico del compuesto.

Estas fases se pueden mostrar en la figura 2 donde se muestra una matriz reticulada polimérica y un refuerzo disperso de nanopartículas metálicas sienten el conjunto de estas fases un nanocompuesto.

2.4.1 Características de los nanocompuestos

Cuando en un compuesto, al menos una de las fases tiene una dimensión característica en el rango de los nanómetros (1 a 100 nm), el material resultante se denomina nanocompuesto. La incorporación de nanomateriales en las matrices convencionales permite obtener materiales con propiedades superiores, tales como mayor resistencia mecánica, mejoras en la conductividad térmica o eléctrica, mayor resistencia a la corrosión o nuevas funcionalidades ópticas o magnéticas (Logakannan et al., 2025).

El desarrollo de nanocompuestos requiere un enfoque riguroso, ya que sus propiedades dependen de varios factores fundamentales, entre los cuales destacan:

- La forma del nanorefuerzo, que puede ser esférica (nanopartículas), cilíndrica (nanotubos), laminar (nanoplaquetas) o fibrosa (nanofibras).
- El tamaño de las partículas a escala nanométrica, ya que una menor dimensión genera mayor área superficial y por lo tanto mayor interacción con la matriz.
- La interacción entre la matriz y el nanomaterial, que influye directamente en la transferencia de carga, adhesión interfacial y estabilidad del compuesto.
- La fracción volumétrica del nanomaterial en el compuesto, la cual debe ser optimizada para evitar aglomeraciones y pérdida de propiedades.
- Las propiedades mecánicas deseadas del producto final, como rigidez, resistencia al impacto, flexibilidad, entre otras.

2.4.2 Aplicaciones de nanocompuestos

Los nanocompuestos han demostrado un amplio potencial en diversas áreas del desarrollo tecnológico, destacando especialmente en campos como la nanomedicina, la catálisis y la biotecnología. Por ejemplo, Aman et al. (2025)

investigaron la síntesis de nanocompuestos de magnetita/quitosano mediante diferentes métodos in situ y ex situ, con potencial aplicación biomédica. Estos nanocompuestos fueron evaluados en términos de quimiosensibilidad frente al carcinoma ascítico de Ehrlich (un tumor epitelial de origen mamario en modelos murinos), así como en su rendimiento hipertérmico bajo un campo magnético alterno, demostrando una respuesta significativa que los posiciona como candidatos prometedores para terapias combinadas en oncología.

Por otro lado, Tantsyrev et al. (2025) desarrollaron un nanocompuesto a base de arabinogalactano (AG) y yodo, el cual fue evaluado por su actividad antimicrobiana frente a una serie de microorganismos de relevancia clínica, incluyendo: *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 27853), *Klebsiella pneumoniae* (ATCC 700603) productora de β -lactamasa de espectro extendido (BLEE), *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923), *Enterococcus faecalis* (ATCC 29212) y el hongo *Candida albicans* (ATCC 90028). Los resultados evidenciaron una marcada actividad bactericida y fungicida, lo que sugiere su potencial aplicación médica como agente antimicrobiano de amplio espectro.

Finalmente, Ho et al. (2025) comprobaron la eficiencia de un nanocompuesto de nitruro de carbono grafítico ($g-C_3N_4$) y óxido de cerio (CeO_2) en la fotodegradación del colorante azul de metileno bajo condiciones de luz solar simulada. La síntesis del nanocompuesto se realizó mediante un enfoque verde, utilizando extracto de hojas de *Cleistocalyx operculatus* como agente reductor. El material obtenido mostró una eficiencia de degradación del 95.7%, atribuida a su alta área superficial, eficiente separación de cargas fotoinducidas y la sinergia funcional entre $g-C_3N_4$ y CeO_2 , consolidándolo como una opción sustentable y efectiva para aplicaciones en tratamiento de aguas contaminadas.

2.5 QUITOSANO

El quitosano es uno de los biopolímeros más empleados en el desarrollo de materiales funcionales. Se trata de un polisacárido lineal que se obtiene a partir de la desacetilación parcial de la quitina. Su estructura química está compuesta por

unidades repetitivas de N-acetil-D-glucosamina y D-glucosamina, unidas mediante enlaces β -(1 $\rightarrow$ 4)-glucosídicos. Esta combinación de unidades le confiere una arquitectura versátil y funcional, que puede ser modificada dependiendo del grado de desacetilación y del peso molecular, dos factores críticos que determinan sus propiedades fisicoquímicas (El-Saadony et al., 2025).

El quitosano contiene grupos funcionales amino (-NH₂) y grupos hidroxilo (-OH), los cuales son responsables de su capacidad para interactuar con una amplia gama de compuestos, incluyendo iones metálicos, biomoléculas y otros polímeros. Estas características hacen del quitosano un polímero bioactivo con una amplia gama de propiedades como biocompatibilidad, biodegradabilidad, mucoadhesividad, actividad antimicrobiana (frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas), capacidad antifúngica, actividad antioxidante, efecto cicatrizante y permeabilidad controlada. Además, su estructura permite la formación de geles, películas, membranas y micro/nanoestructuras, lo que facilita su aplicación en distintos formatos según el objetivo deseado (El-Saadony et al., 2025).

El grado de desacetilación, que se refiere al porcentaje de grupos acetilo eliminados de la quitina original, afecta directamente su solubilidad en medios ácidos, su carga superficial positiva y su capacidad para formar complejos iónicos. Un mayor grado de desacetilación generalmente se asocia con una mayor solubilidad y actividad biológica. Por otro lado, el peso molecular del quitosano determina su viscosidad, su capacidad de formación de membranas o fibras, y su interacción con otros materiales. Quitosanos de bajo peso molecular son más solubles y adecuados para aplicaciones donde se requiere absorción celular rápida, mientras que los de alto peso molecular son preferidos en aplicaciones estructurales o de liberación prolongada (El-Saadony et al., 2025).

En el campo de la nanotecnología, el quitosano ha demostrado ser un excelente candidato para la síntesis de nanocompuestos, ya sea como matriz principal o como recubrimiento bioactivo de nanopartículas metálicas, óxidos metálicos o materiales híbridos. Gracias a su naturaleza polielectrolítica, puede estabilizar nanopartículas, mejorar su biocompatibilidad y proporcionar sitios de funcionalización para

aplicaciones específicas, como la liberación dirigida de fármacos, la terapia antimicrobiana, la ingeniería de tejidos o incluso la remediación ambiental (El-Saadony et al., 2025).

2.5.1 Origen y extracción

El quitosano es un derivado de la quitina, uno de los biopolímeros más abundantes del planeta, presente principalmente en los exoesqueletos de crustáceos como camarones, cangrejos y langostas, así como en las paredes celulares de hongos. La quitina está compuesta por unidades de N-acetil-D-glucosamina unidas por enlaces β -(1 $\rightarrow$ 4), como se muestra en la figura 3; y se caracteriza por su alta cristalinidad, rigidez y baja solubilidad en medios acuosos. Sin embargo, al ser sometida a un proceso químico denominado desacetilación, se transforma en quitosano, un material con mejores propiedades de solubilidad y funcionalidad, ampliamente utilizado en aplicaciones industriales, biomédicas y tecnológicas (De Maria Aguiar Carvalho et al., 2025).

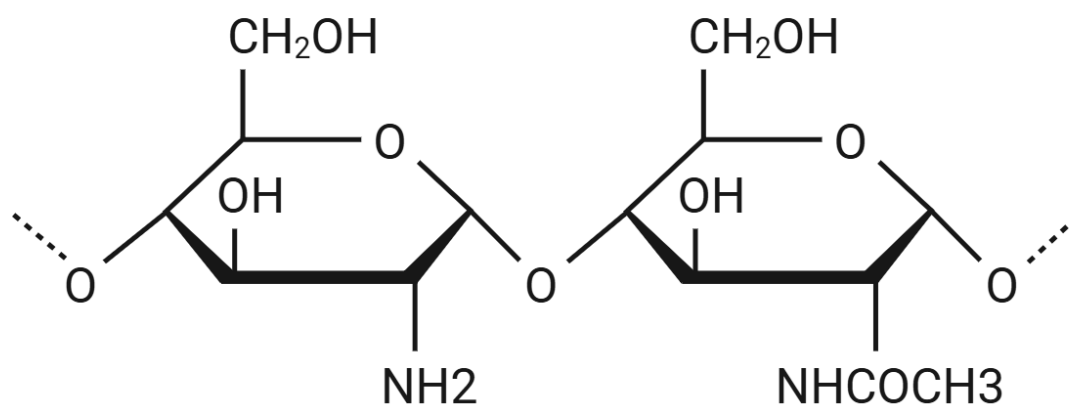


Figura 3. Estructura molecular del Quitosano (De Mara Aguiar Carvalho et al., 2025).

La obtención del quitosano implica varias etapas críticas. En primer lugar, se realiza una desproteinización utilizando soluciones alcalinas, como hidróxido de sodio, para eliminar las proteínas asociadas a la quitina. Luego, se lleva a cabo una desmineralización con ácidos suaves, como ácido clorhídrico, para remover compuestos inorgánicos como el carbonato de calcio. En algunos casos, se realiza una decoloración adicional mediante agentes oxidantes para mejorar la apariencia

del producto final, especialmente cuando se requiere quitosano con alto grado de blancura para usos médicos o cosméticos. Finalmente, se procede a la etapa de desacetilación, en la que la quitina es tratada con soluciones concentradas de álcali a altas temperaturas para eliminar grupos acetilo y liberar grupos amino, obteniendo así el quitosano (Sun et al., 2023).

Las propiedades finales del quitosano, como su solubilidad, viscosidad, reactividad química y actividad biológica, dependen en gran medida de dos parámetros fundamentales: el grado de desacetilación y el peso molecular. Un mayor grado de desacetilación suele asociarse con una mayor solubilidad en medios ácidos y una mayor actividad biológica, mientras que el peso molecular influye directamente en la viscosidad de las soluciones de quitosano y su capacidad para formar películas, geles o redes tridimensionales (Shamsabadi et al., 2025).

El quitosano destaca por su biocompatibilidad, biodegradabilidad, actividad antimicrobiana, antifúngica, capacidad de formar membranas, mucoadhesividad y capacidad de quelar metales pesados, lo que lo convierte en un material atractivo para diversas aplicaciones. En el ámbito biomédico, se utiliza en la fabricación de apósitos para heridas, sistemas de liberación controlada de fármacos, injertos tisulares y materiales para ingeniería de tejidos. En la agricultura, se ha empleado como biofertilizante, bioestimulante y agente de control de plagas. También ha ganado atención en la industria alimentaria como recubrimiento comestible y agente conservante, y en la nanotecnología, como base para la síntesis de nanocompuestos funcionales, por su facilidad para ser modificado químicamente e incorporarse con otros materiales (Zhang et al., 2025).

En años recientes, se han investigado métodos de extracción alternativos al proceso químico tradicional, como el uso de procesos enzimáticos o fermentativos que emplean bacterias o hongos para degradar las proteínas y minerales de la quitina de manera más sostenible y ambientalmente amigable. Sin embargo, estos métodos aún están en desarrollo para su aplicación a gran escala, debido a costos y tiempos de producción mayores comparados con el método químico convencional (Sun et al., 2023).

2.5.2 Estructuras con quitosano

El quitosano es altamente versátil que puede desempeñar el rol de matriz o refuerzo en la formación de nanocompuestos, dependiendo del diseño del sistema y su aplicación.

Como matriz, el quitosano forma la fase continua del material, en la cual se dispersan los nanomateriales de refuerzo. En esta función, puede adoptar diversas estructuras tridimensionales, como membranas, hidrogeles, nanocápsulas, espumas porosas o fibras, gracias a las interacciones entre sus grupos amino e hidroxilo, que favorecen la reticulación y adhesión con otras fases (Zhou et al., 2025).

Por otro lado, cuando el quitosano actúa como refuerzo, se incorpora a una matriz diferente en forma de partículas, fibras, esferas o capas delgadas. En este caso, aporta propiedades funcionales como biocompatibilidad, actividad antimicrobiana, adhesividad celular y resistencia mecánica. Su estructura dispersa permite mejorar las propiedades del compuesto mediante interacciones químicas o físicas con la matriz anfitriona (Zhou et al., 2025),

En ambos casos, la estructura adoptada por el quitosano influye directamente en la eficiencia del nanocompuesto, ya que determina la superficie de contacto, la estabilidad del sistema y la distribución del refuerzo (Zhou et al., 2025).

2.5.3 Aplicaciones

El quitosano por sus propiedades de biocompatibilidad, biodegradabilidad, actividad antimicrobiana y capacidad para formar membranas, geles y estructuras porosas; se ha convertido en un material con un campo de aplicación amplio en distintas industrias.

En biomedicina, el quitosano se emplea en la fabricación de membranas semipermeables para hemodiálisis, gracias a su alta afinidad por proteínas y su capacidad de modulación de poros. También se utiliza en la elaboración de suturas biodegradables y como agente cicatrizante, favoreciendo la regeneración tisular y reduciendo el riesgo de infecciones. Asimismo, forma parte de sistemas de liberación controlada de fármacos, donde actúa como matriz o portador, permitiendo

una dosificación sostenida y dirigida de compuestos terapéuticos, incluso a nivel nanométrico (Velásquez, 2003).

En el sector agropecuario, el quitosano ha demostrado ser una herramienta valiosa. Se emplea como recubrimiento para semillas, prolongando su viabilidad y protegiéndolas contra patógenos. También actúa como portador de fertilizantes, facilitando su liberación controlada en el suelo, y es parte de formulaciones bioestimulantes y pesticidas naturales. En la alimentación animal, puede incluirse como suplemento, mejorando la salud intestinal y el sistema inmunológico de los animales (Zerpa et al., 2017).

En la industria cosmética, el quitosano se incorpora en productos como espumas de afeitar, cremas, geles y lociones, aprovechando sus propiedades hidratantes, filmógenas y antimicrobianas. Su capacidad para formar una película protectora sobre la piel también lo hace útil en productos antiacné y cicatrizantes (Velásquez, 2003).

Además, el quitosano tiene aplicaciones en la industria textil, donde se utiliza para la producción de fibras con propiedades antimicrobianas, y en la fabricación de papel, al mejorar la resistencia mecánica y conferir propiedades funcionales como la repelencia al agua. En la industria alimentaria, se emplea como espesante, estabilizante y agente conservante, así como en formulaciones de productos funcionales o nutraceuticos. También ha sido explorado como agente en procesos de oxidación controlada, útil en aplicaciones industriales y ambientales (Velásquez, 2003).

2.5.4 Quitosano y la Nanotecnología

La aplicación de nanomateriales estructurados a partir de quitosano abarca una amplia gama de usos en distintos campos científicos e industriales. Estos nanomateriales se utilizan eficazmente en la remoción de contaminantes ambientales, como metales pesados, colorantes y compuestos orgánicos persistentes, gracias a su alta superficie específica y la presencia de grupos funcionales activos (Nuruzzaman & Mondal, 2025).

En el área biomédica y farmacéutica, el quitosano permite la generación de biomateriales con propiedades bioactivas, como actividad antimicrobiana, antiinflamatoria y regenerativa. Asimismo, se emplea en el diseño de nanotransportadores para la liberación dirigida de fármacos, genes o proteínas terapéuticas, mejorando la biodisponibilidad y reduciendo efectos secundarios (Koirala et al., 2024).

La incorporación de nanoquitosano en formulaciones actúa como potenciador de actividad biológica y funcional, ya sea en cosméticos, alimentos o productos biomédicos. Además, la síntesis de nanocompuestos metálicos basados en quitosano (por ejemplo, con plata, oro o óxidos metálicos) ha demostrado gran eficacia en aplicaciones antimicrobianas, cicatrizantes y anticancerígenas (Darwesh et al., 2024).

Por otro lado, el quitosano funcionalizado se emplea en el desarrollo de materiales para detección y control nanotecnológico, como en sistemas de detección óptica, fototérmica o electroquímica, especialmente relevantes para sensores biomoleculares y sistemas de diagnóstico (Zheng et al., 2025).

2.6 PLATINO

El platino (Pt) es un elemento químico perteneciente al grupo 10 y al periodo 6 de la tabla periódica, con número atómico 78 y configuración electrónica $[\text{Xe}] 4f^{14}5d^96s^1$. Es un metal de transición noble que se distingue por su alta estabilidad química, resistencia a la corrosión y excelentes propiedades catalíticas (Trumic et al., 2015).

Tiene una densidad de 21.45 g/cm^3 , lo que lo convierte en uno de los metales más densos. Su punto de fusión es de $1768.3 \text{ }^\circ\text{C}$ y su punto de ebullición de $3825 \text{ }^\circ\text{C}$, lo cual le confiere gran resistencia térmica. Es de color blanco plateado, altamente maleable y dúctil, lo que permite su laminación en hojas muy delgadas o su estiramiento en hilos sin fracturarse (Trumic et al., 2015).

A pesar de su clasificación como metal noble, el platino muestra una notable reactividad química, siendo capaz de formar compuestos en múltiples estados de

oxidación, principalmente 0, +2, +4, +5 y +6, aunque los más comunes son +2 y +4. Esta versatilidad le permite formar complejos de coordinación estables con una amplia variedad de ligandos, lo que lo hace muy utilizado en la química organometálica (Trumic et al., 2015).

2.6.1 Origen

La platina, un mineral raro asociado frecuentemente al oro, fue durante mucho tiempo ignorada y considerada poco valiosa. En sus primeras apariciones, se le percibía como una impureza indeseada que disminuía la calidad del oro, haciendo que las menas que contenían ambos metales se consideraran una inversión poco rentable. Esta percepción desfavorable, más relacionada con aspectos político-económicos que científicos, llevó a que su verdadero potencial pasara desapercibido durante décadas (Aristizábal-Fúquene et al., 2015).

Sin embargo, este obstáculo inicial se transformó con el tiempo en un interés científico creciente. En el año 1750, Charles Wood y sus colaboradores desarrollaron un primer método de separación de la platina utilizando ácido nítrico, lo que marcó el inicio del estudio sistemático del platino como elemento (Aristizábal-Fúquene et al., 2015).

Posteriormente, en 1786, Francisco Antonio Chavaneau, trabajando en la Casa de La Moneda de Nueva Granada (hoy Colombia), perfeccionó un método más eficiente para su aislamiento. Su procedimiento consistía en disolver la platina en agua regia, formar un precipitado de cloroplatinato amónico, y luego recuperar el platino metálico mediante descomposición térmica. Finalmente, mediante técnicas de metalurgia se lograban obtener barras de platino con alto grado de pureza (Aristizábal-Fúquene et al., 2015).

2.6.2 Usos

El platino se ha consolidado como uno de los metales más valiosos en la industria química e ingenieril debido a su extraordinaria actividad catalítica, estabilidad térmica y resistencia a la corrosión. Su uso más destacado es como catalizador heterogéneo en diversos procesos industriales de gran escala. Entre ellos se encuentra el reformado catalítico de hidrocarburos, fundamental en la producción

de gasolina de alto octanaje y compuestos aromáticos utilizados como precursores petroquímicos. También desempeña un papel esencial en la síntesis de ácido nítrico, mediante la oxidación catalítica del amoníaco, un paso clave en la fabricación de fertilizantes nitrogenados (Aguilar Cuevas,2012).

Además, el platino es un componente crucial en los convertidores catalíticos automotrices, donde actúa facilitando la conversión de gases tóxicos como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los hidrocarburos no quemados en productos menos dañinos, como dióxido de carbono (CO₂), nitrógeno (N₂) y vapor de agua. Este uso ha sido decisivo para reducir las emisiones contaminantes de los vehículos a combustión interna y cumplir con normativas ambientales cada vez más estrictas (Aguilar Cuevas,2012).

En el campo biomédico destacan sus contribuciones en compuestos antitumorales, debido al descubrimiento de Barnett Rosenberg, quien investigaba el efecto de un campo eléctrico en la división celular de la bacteria E. coli en una solución de NH₄Cl y electrodos de platino, las bacterias expuestas a este campo eléctrico en la solución conductora perdieron la capacidad de replicar su material genético, pero continuaba intacta su capacidad para producir proteínas y ARN. Este comportamiento se debía a la aparición del compuesto cis-[PtCl₂(NH₃)₂] en la solución. Al lograr detener la replicación celular este compuesto fue probado en tumores de cáncer de modelos murinos, logrando reducir considerablemente su expansión y tamaño (Aguilar Cuevas,2012).

2.6.3 Potencial regenerativo

Las nanopartículas de platino han demostrado un notable potencial en el campo de la ingeniería de tejidos y la reparación tisular, gracias a sus propiedades catalíticas, antioxidantes y antimicrobianas. Su capacidad para eliminar especies reactivas de oxígeno contribuye directamente a crear un entorno celular más favorable para la regeneración y cicatrización. Las especies reactivas de oxígeno, como el anión superóxido (O₂⁻), el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y el radical hidroxilo (•OH), se generan de forma natural durante el metabolismo celular, pero su acumulación excesiva conduce a estrés oxidativo, dañando proteínas, lípidos, ácidos nucleicos y

afectando el funcionamiento mitocondrial. Este daño celular impide la correcta reparación del tejido y promueve la inflamación crónica.

Las nanopartículas de platino actúan de forma similar a enzimas antioxidantes como la dismutasa (SOD), la catalasa (CAT) y la peroxidasa (POD), neutralizando eficazmente las ROS y restaurando el equilibrio redox en el microambiente tisular (Wang et al., 2023). Esta acción antioxidante favorece la proliferación y diferenciación celular, lo cual es esencial en procesos de reparación de heridas y regeneración de tejidos.

Además, las nanopartículas de platino han sido asociadas con la modulación de factores moleculares clave en la regeneración celular, como el factor de crecimiento transformante beta 1 (TGF- β 1) y la α -actina del músculo liso (α -SMA), ambos implicados en la migración celular, la síntesis de matriz extracelular y la remodelación tisular (Arumugam et al., 2024).

En el caso del tejido nervioso, se ha observado que la aplicación de nanopartículas de platino puede reducir el estrés oxidativo en neuronas y células gliales, promoviendo un entorno más favorable para la neurogénesis y la reconexión sináptica, especialmente en condiciones de daño inducido por trauma o enfermedad neurodegenerativa. Estos efectos posicionan al platino como una opción prometedora en el diseño de biomateriales para regeneración nerviosa, incluyendo andamios y sistemas de liberación intracelular de factores neurotróficos (Qian et al., 2021).

Las nanopartículas de platino presentan actividad antibacteriana, lo que les permite prevenir infecciones en heridas abiertas, lo que refuerza su utilidad clínica. Esta combinación de propiedades convierte a las nanopartículas de platino en una herramienta multifuncional de alto valor en medicina regenerativa, especialmente en aplicaciones orientadas a la piel, tejidos musculares y el sistema nervioso.

2.7 TÉCNICA DE ELECTROHILADO

El electrohilado es una técnica versátil que permite la fabricación de fibras con diámetros de sección transversal que van desde decenas hasta cientos de nanómetros, con una gran área superficial y porosidad. Estas propiedades facilitan la creación de sitios activos, lo que, en el caso de sistemas catalíticos, podría conducir a una mayor actividad catalítica en comparación con los catalizadores en polvo. Además, el proceso de electrohilado permite un control preciso sobre la morfología y la estructura de las fibras, lo cual es crucial para adaptar sus propiedades finales a reacciones específicas (Malara, 2024).

2.7.1 Fundamento de método

El sistema más elemental utilizado en el proceso de electrohilado está conformado por varios componentes fundamentales: una fuente de alta tensión, una jeringa, una bomba conectada a dicha jeringa, una aguja o capilar, y un colector metálico. Este equipo tiene la flexibilidad de ser instalado tanto en posición horizontal como vertical, dependiendo de las necesidades del proceso. En cuanto al colector, puede ser tan simple como una placa metálica plana, o bien, puede adoptar estructuras más complejas y sofisticadas, diseñadas específicamente para evitar la formación aleatoria de fibras, optimizando así el proceso de electrohilado, conformado de forma general como se muestra en la figura 4 (Abraham 2020, n.d.).

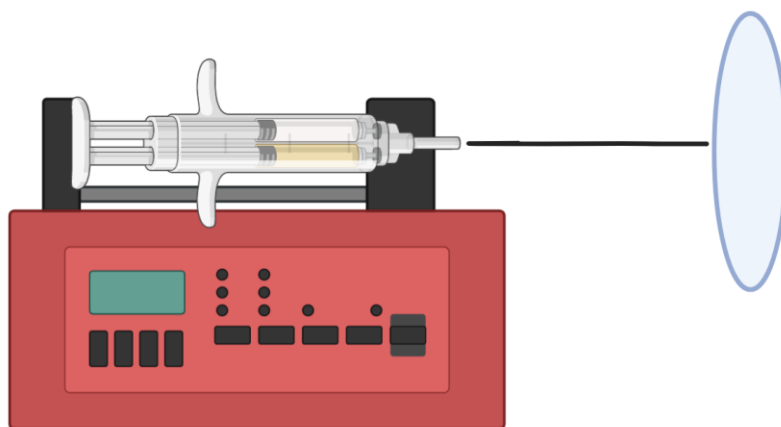


Figura 4. Diagrama general del equipo de electrohilado (Propia autoría, generado mediante Biorender.com)

Cuando la solución comienza a ser bombeada a través de la jeringa, una gota se forma en la punta de la aguja, y permanece allí debido a la acción de la tensión superficial del líquido. Esta gota es inicialmente de forma hemisférica. Sin embargo, al aplicar una diferencia de potencial eléctrico entre la aguja y el colector, generalmente en un rango que va de 5 a 30 kV, se induce un cambio en la forma de la gota. La tensión superficial de la gota es superada por la fuerza del campo eléctrico, lo que provoca que la gota se alargue y tome una forma cónica en dirección hacia el colector. Este fenómeno recibe el nombre de "cono de Taylor", y es una de las características más distintivas de este proceso. El campo eléctrico aplicado no solo genera la elongación de la gota, sino que también tiene un efecto sobre las cargas presentes en el polímero. Estas cargas, ya sean iones o cargas de otro tipo, migran hacia la superficie de la gota debido a la influencia del campo eléctrico. A medida que se acumulan cargas sobre la superficie de la gota, se genera una repulsión electrostática entre ellas, que compite con la tensión superficial del líquido. Esta competencia es esencial para el proceso, ya que, al alcanzar un nivel crítico de diferencia de potencial, la repulsión electrostática entre las cargas en la superficie de la gota finalmente supera la tensión superficial del líquido, lo que da lugar a la expulsión de un microchorro de solución desde la punta del cono de Taylor (*Abraham 2020, n.d.*).

El microchorro eyectado a gran velocidad se desplaza en dirección al colector, pero en su trayecto se ve afectado por inestabilidades eléctricas, lo que puede provocar que el chorro sufra pequeñas perturbaciones a lo largo de su trayectoria. Estas inestabilidades son el resultado de un desequilibrio de cargas en el chorro, que no se encuentran en una configuración estable. Además, a medida que el chorro avanza, su diámetro va disminuyendo gradualmente, lo cual es un efecto combinado de estas inestabilidades eléctricas y la evaporación del solvente presente en la solución, que ocurre durante el viaje hacia el colector. Estas inestabilidades pueden ser consideradas una consecuencia directa del desequilibrio entre las fuerzas electrostáticas que actúan sobre las cargas del chorro. Una vez que el chorro cargado llega al colector, es recogido y se solidifica, formando fibras delgadas que

pueden ser utilizadas para diversos fines, dependiendo de las propiedades específicas del material utilizado en el proceso (Abrahan 2020, n.d.)

2.7.2 Electrohilado coaxial

El proceso de electrohilado coaxial se basa en la técnica de cohilado simultáneo de dos líquidos poliméricos distintos. Este enfoque innovador implica la utilización de un sistema especializado para formar fibras con una estructura de núcleo/capa, en el cual se emplean dos agujas dispuestas de manera coaxial. La disposición coaxial de las agujas permite que los líquidos poliméricos se suministren de manera separada pero simultánea, lo que da lugar a la creación de fibras compuestas que presentan dos componentes diferentes: un núcleo interno y una capa externa. En este sistema, el líquido que forma el núcleo, es decir, la fase interna, se bombea a través de la aguja situada en el interior, mientras que el material destinado a formar la capa externa se suministra a través de la aguja externa, que rodea a la aguja interna. Ambas soluciones se introducen en la misma región del proceso de electrohilado, pero se mantienen separadas, lo que garantiza que cada componente conserve sus propiedades y características originales. Este diseño coaxial mostrado en la figura 5, permite la formación de gotas poliméricas compuestas en la punta de las agujas, donde la interacción de ambos líquidos comienza a tomar forma (Buzgo et al., 2018).

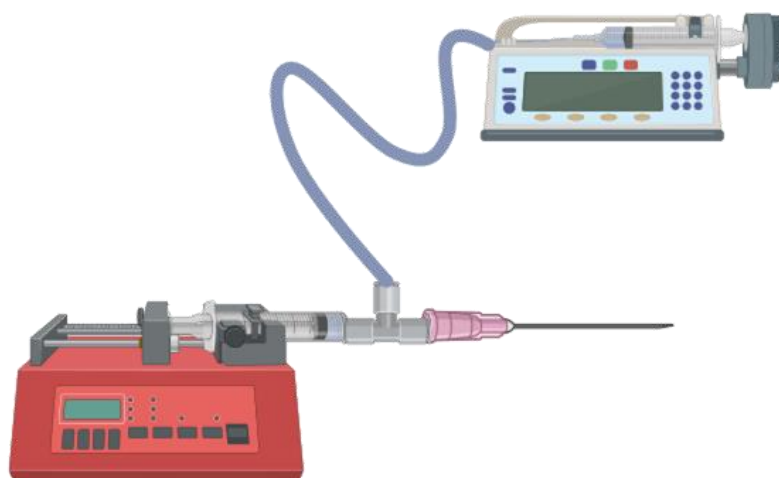


Figura 5. Diagrama del sistema para electrohilado coaxial de doble bomba (Propia autoría, generado mediante Biorender.com)

Cuando se aplica un campo eléctrico de alta intensidad, el comportamiento de estas gotas poliméricas cambia. El campo eléctrico induce la elongación de las gotas, y la repulsión electrostática entre las cargas presentes en las soluciones provoca la formación de chorros de electrohilado compuestos. Estos chorros, al ser eyectados desde las agujas, se solidifican mientras se desplazan hacia el colector, dando lugar a la creación de fibras con una estructura de núcleo/capa, en la que el material del núcleo está rodeado por la capa externa formada por el otro polímero. Este proceso de electrohilado coaxial permite, por tanto, la fabricación de fibras con una estructura multicapa que puede ser ajustada para diversas aplicaciones, desde la mejora de propiedades mecánicas y químicas hasta la creación de sistemas de liberación controlada de fármacos, entre otras aplicaciones. La capacidad de combinar dos materiales diferentes en una sola fibra amplía enormemente las posibilidades de diseño y funcionalidad de los productos fabricados mediante electrohilado coaxial.

2.7.3 Electrohilado de quitosano

El quitosano ha sido ampliamente utilizado en la elaboración de apósitos biomédicos destinados al tratamiento de heridas, quemaduras y procesos de cicatrización, debido a sus propiedades biocompatibles, biodegradables, antimicrobianas y hemostáticas. No obstante, al ser un polisacárido con carga positiva en solución, las moléculas de quitosano tienden a repelerse entre sí, lo que altera la estabilidad del cono de Taylor durante el proceso de electrohilado y dificulta la formación uniforme de fibras (Yu et al., 2025).

Para contrarrestar esta limitación y mejorar las propiedades fisicoquímicas del sistema, se han incorporado diversos polímeros auxiliares como el alcohol polivinílico (PVA), el polietilenglicol (PEG), el ácido poliláctico (PLA), la gelatina o el colágeno. Entre ellos, el alcohol polivinílico ha sido el más utilizado debido a su no toxicidad, biocompatibilidad, biodegradabilidad y su excelente capacidad para formar fibras y membranas estables (Yu et al., 2025). Su combinación con quitosano permite obtener una mezcla polimérica óptima para electrohilado, generando estructuras más homogéneas y funcionales.

El material resultante, obtenido mediante la técnica de electrohilado de quitosano-PVA, forma una matriz tridimensional fibrosa con ventajas significativas respecto a apósitos o gasas convencionales. Estas estructuras presentan una mayor porosidad, permeabilidad al vapor de agua, aislamiento bacteriano, una superficie específica elevada y la capacidad de intercambiar gases y nutrientes, lo que favorece notablemente el microambiente para la regeneración tisular. Además, su estructura biomimética imita la arquitectura de la matriz extracelular, lo que estimula la adhesión, proliferación y migración celular, posicionando a este tipo de apósitos como una alternativa altamente bioactiva y eficiente para la cicatrización de heridas complejas (Yu et al., 2025).

El rendimiento y las propiedades de las membranas electrohiladas varían en función de los parámetros del proceso, los cuales deben ajustarse según la aplicación deseada. Para sistemas basados en quitosano, los voltajes típicos oscilan entre 20 y 30 kV, con caudales de solución entre 0.3 y 0.9 mL/h, y distancias entre la aguja y el recolector de 10 a 20 cm, utilizando recolectores tanto fijos como rotatorios según se requiera controlar la alineación de las fibras (Parvinnasab et al., 2024). La optimización de estas variables permite diseñar membranas con características mecánicas y biofuncionales específicas para aplicaciones en medicina regenerativa.

2.8 SISTEMA NERVIOSO

El sistema nervioso se divide, para fines de estudio, en sistema nervioso central y sistema nervioso periférico. No obstante, esta división no implica una separación anatómica estricta, ya que ambos sistemas están estrechamente conectados mediante fibras nerviosas aferentes y eferentes, que permiten la comunicación bidireccional: muchas estructuras del sistema nervioso periférico tienen su origen o terminación en el sistema nervioso central (Gunsch et al., 2023).

Desde un punto de vista funcional, el sistema nervioso también se clasifica en sistema nervioso somático y sistema nervioso autónomo. El sistema somático se encarga del control voluntario del cuerpo, incluyendo el movimiento de los músculos esqueléticos, y de la recepción consciente de estímulos externos mediante los

órganos sensoriales. Por otro lado, el sistema nervioso autónomo regula funciones involuntarias e inconscientes, como la actividad cardíaca, la digestión, la respiración y la secreción glandular, manteniendo el equilibrio interno u homeostasis del organismo (Gunsch et al., 2023).

2.8.1 Sistema nervioso Central

El sistema nervioso central se localiza en la cavidad craneal y en el conducto raquídeo de la columna vertebral. Anatómicamente, se divide en encéfalo y médula espinal (también llamada cordón medular) (Caballero, 2018).

El encéfalo, ubicado dentro de la cavidad craneal, está constituido por tres estructuras principales: el cerebro, el cerebelo y el tronco encefálico. A su vez, el tronco encefálico se subdivide en mesencéfalo, puente (protuberancia) y médula oblonga (también conocida como bulbo raquídeo) (Caballero, 2018).

El tejido del sistema nervioso central se organiza en dos componentes fundamentales: sustancia gris y sustancia blanca. La sustancia gris está formada principalmente por somas neuronales, dendritas, sinapsis y cuerpos de células gliales, y se encuentra en estructuras como la corteza cerebral, los núcleos profundos y la sustancia gris medular. Por su parte, la sustancia blanca está compuesta por fibras nerviosas mielínicas, es decir, axones rodeados por mielina, junto con células gliales especializadas, como los oligodendrocitos (Caballero, 2018).

2.8.2 Sistema nervioso periférico

El sistema nervioso periférico (SNP) está constituido por todas aquellas estructuras nerviosas que se localizan fuera de la cavidad craneal y del conducto raquídeo. Su función esencial es establecer la conexión funcional entre el sistema nervioso central (SNC) y los órganos, tejidos y receptores periféricos del cuerpo, permitiendo así la innervación sensitiva y motora de la periferia (Caballero, 2018).

Este sistema está conformado por ganglios nerviosos y nervios periféricos. Los ganglios son cúmulos de somas neuronales situados fuera del SNC, y actúan como centros de relevo y procesamiento de señales. Los nervios periféricos, por su parte,

están formados por fibras nerviosas, ya sean mielínicas o amielínicas, organizadas y protegidas por capas de tejido conjuntivo especializado. Estas fibras se disponen en haces estructurados que, desde el interior hacia el exterior, están envueltos por el endoneuro, el perineuro y el epineuro. El endoneuro rodea a cada fibra nerviosa individualmente, el perineuro agrupa varias fibras en fascículos y actúa como barrera de protección, y el epineuro recubre todo el conjunto del nervio, otorgándole soporte mecánico y flexibilidad (Caballero, 2018).

Los nervios del SNP son los encargados de establecer la comunicación entre el sistema nervioso central y la periferia corporal. Esta comunicación es bidireccional: por medio de fibras aferentes, transportan la información sensitiva desde los receptores periféricos hacia el SNC; mientras que, mediante fibras eferentes, conducen las respuestas motoras del SNC hacia músculos, glándulas u otros órganos efectores (Caballero, 2018).

2.8.3 Tejido nervioso

El tejido nervioso está compuesto por dos tipos principales de células: las neuronas y las células gliales. Este tejido forma la base estructural y funcional del sistema nervioso, el cual se encarga de regular y coordinar múltiples procesos en el organismo, tanto funcionales como homeostáticos, a través de la transmisión de impulsos eléctricos y señales químicas (Caballero, 2018).

Las neuronas son las células especializadas responsables de recibir, procesar y transmitir estímulos, tanto del entorno externo como del interior del organismo. Esta capacidad se debe a su propiedad de excitabilidad eléctrica y conducción sináptica, lo que les permite generar respuestas rápidas y precisas en todo el cuerpo. Por su parte, las células gliales desempeñan funciones esenciales de sostén estructural, protección, nutrición y regulación del microambiente neural. Además, participan en procesos de reparación tisular, formación de mielina y modulación sináptica. Aunque no conducen impulsos eléctricos como las neuronas, su presencia es fundamental para mantener la integridad y funcionalidad del sistema nervioso (Caballero, 2018).

En conjunto, el tejido nervioso constituye la infraestructura biológica del sistema nervioso, y es indispensable para funciones como el pensamiento, la percepción, el movimiento, la memoria y la autorregulación corporal (Caballero, 2018).

2.8.4 Conformación del tejido nervioso

2.8.4.1 Neuronas

Las neuronas son células altamente especializadas encargadas de recibir, procesar y transmitir estímulos en forma de impulsos eléctricos y señales químicas. Su morfología característica está compuesta por tres partes principales: el soma o cuerpo celular, las dendritas y el axón. El soma es la región central de la neurona, donde se encuentra el núcleo, típicamente vesiculoso, grande y esférico, a menudo con un nucléolo prominente. En ciertos casos, puede presentar doble núcleo, especialmente en neuronas de gran tamaño. El citoplasma del soma se conoce como pericarion y contiene abundante retículo endoplásmico rugoso (también llamado sustancia de Nissl), mitocondrias y aparato de Golgi, que participan en la síntesis y transporte de proteínas (Barbeito et al., 2022).

Las dendritas son prolongaciones cortas, ramificadas y numerosas que se proyectan desde el soma. Su función principal es recibir señales de otras neuronas. Sobre su superficie se encuentran pequeñas protuberancias llamadas espinas dendríticas, que constituyen el sitio principal de sinapsis excitatoria y permiten una alta capacidad de integración sináptica (Barbeito et al., 2022).

El axón, por su parte, es una prolongación única, más larga y delgada que las dendritas. Se origina en una región especializada del soma llamada cono axónico o segmento inicial, donde se inicia el potencial de acción. A lo largo de su trayecto, el axón puede mantenerse de calibre constante y, en su extremo, formar ramificaciones terminales que establecen sinapsis con otras neuronas, células musculares o glándulas (Barbeito et al., 2022).

Las neuronas poseen un citoesqueleto especializado compuesto por microtúbulos, microfilamentos y neurofilamentos. Los neurofilamentos se agrupan en neurofibrillas, que se distribuyen por toda la neurona, especialmente en el axón,

cumpliendo funciones estructurales y facilitando el transporte axoplásmico de organelos y vesículas (Barbeito et al., 2022).

La clasificación de las neuronas puede hacerse según distintos criterios:

- Por morfología: según el número y disposición de sus prolongaciones (por ejemplo, unipolares, bipolares, multipolares).
- Por la longitud del axón: neuronas de proyección (axón largo) o interneuronas (axón corto).
- Por función:
 - Neuronas sensoriales (aférentes), que transmiten información desde receptores hacia el sistema nervioso central.
 - Neuronas motoras (eferentes), que conducen señales desde el sistema nervioso central hacia los efectores (músculos o glándulas).
 - Interneuronas, que interconectan otras neuronas dentro del sistema nervioso central y participan en la integración de la información (Barbeito et al., 2022).

2.8.4.2 Células gliales

Durante mucho tiempo se pensó que las células gliales tenían un papel limitado al sostén físico y estructural de las neuronas, lo que dio origen a su nombre: *glía*, término derivado del griego que significa “pegamento”. Sin embargo, los avances en neurociencia han revelado que estas células desempeñan funciones mucho más complejas y activas dentro del sistema nervioso. Actualmente se reconoce una amplia diversidad de células gliales, distribuidas tanto en el sistema nervioso central como en el periférico. De acuerdo con esta división anatómica, se distingue entre glía central y glía periférica (Barbeito et al., 2022).

La glía central, correspondiente al sistema nervioso central, está compuesta por los endoteliales o glía epitelial, los astrocitos o astroglia, los oligodendrocitos

(oligodendroglía) y las células de la microglía. Estas células cumplen funciones fundamentales en la producción de líquido cefalorraquídeo, en la mielinización de los axones del SNC, en el sostenimiento estructural y metabólico de las neuronas, así como en la vigilancia inmunitaria del tejido nervioso (Barbeito et al., 2022).

Por otro lado, la glía periférica, localizada en el sistema nervioso periférico, está formada por las células de Schwann, las células satélites y la glía entérica. Estas células participan en la mielinización de los nervios periféricos, en el soporte de las neuronas en los ganglios nerviosos y en la regulación funcional del sistema nervioso entérico, respectivamente (Barbeito et al., 2022).

2.8.4.3 Fibras

En el sistema nervioso, las fibras nerviosas están constituidas por los axones recubiertos por estructuras protectoras denominadas vainas, cuya función es preservar la integridad del axón y facilitar la conducción del impulso nervioso. Existen dos tipos principales de recubrimiento: la vaina de mielina y la vaina de Schwann. Todas las fibras del sistema nervioso periférico están asociadas a células de Schwann, aunque no todas presentan mielina. En el sistema nervioso parasimpático, por ejemplo, pueden encontrarse tanto fibras mielínicas como amielínicas (Menconi et al., 2021).

Las fibras mielínicas se caracterizan por estar recubiertas por una vaina de mielina compuesta por múltiples capas concéntricas de membrana plasmática ricas en lípidos, principalmente colesterol, fosfolípidos y glicolípidos, derivados de las células de Schwann en el SNP o de los oligodendrocitos en el SNC. La presencia de mielina permite una conducción saltatoria del impulso eléctrico a través de los nódulos de Ranvier, lo cual incrementa significativamente la velocidad de conducción nerviosa en comparación con las fibras que no la poseen (Menconi et al., 2021).

Por otro lado, las fibras amielínicas, propias del sistema nervioso periférico, no presentan mielina, pero sí están asociadas a células de Schwann. En estos casos, los axones se alojan en surcos longitudinales dentro del citoplasma de las células de Schwann, que se pliegan para formar vías de conducción protegidas, aunque sin la envoltura lipídica característica. Una única célula de Schwann puede albergar y

recubrir varios axones amielínicos, formando vainas bien definidas, aunque sin segmentación ni nódulos (Menconi et al., 2021).

2.8.5 Sinapsis

La sinapsis es el proceso mediante el cual se transmite información de una neurona a otra, y también se refiere al espacio especializado de contacto entre ambas células. Dependiendo de la región de la célula donde ocurre esta interacción, las sinapsis pueden clasificarse en varios tipos: axodendríticas (entre el axón de una neurona y la dendrita de otra), axoaxónicas (entre dos axones), axosomáticas (entre un axón y el soma), dendrodendríticas (entre dendritas), dendrosomáticas (entre dendrita y soma) y somasomáticas (entre somas neuronales) (Corona, 2021).

En cuanto al mecanismo de transmisión, existen dos tipos principales de sinapsis: eléctrica y química. En la sinapsis eléctrica, las membranas celulares de las neuronas están unidas por uniones tipo nexo (gap junctions), que permiten el paso directo de iones y pequeñas moléculas de una célula a otra, lo que genera una transmisión rápida y bidireccional del impulso (Corona, 2021).

Por otro lado, en la sinapsis química, la señal se transmite mediante neurotransmisores, que son liberados por la neurona presináptica en la hendidura sináptica y actúan sobre receptores específicos en la membrana de la neurona postsináptica. Este tipo de sinapsis es más lento que la eléctrica, pero permite una mayor modulación, especificidad y amplificación de la señal (Corona, 2021).

2.8.6 Mecanismos de regeneración

En el sistema nervioso periférico, cuando un nervio es seccionado, los axones distales degeneran y son eliminados por macrófagos, mientras que las células de Schwann permanecen activas y desempeñan un papel fundamental en la guía del crecimiento axonal. Si los extremos del nervio lesionado permanecen próximos y alineados, las células de Schwann organizan estructuras tubulares que orientan el crecimiento del axón hacia su blanco original. En cambio, si esta alineación no se da, los axones crecen de manera desorganizada, dando lugar a la formación de un neuroma, una masa de fibras nerviosas mal orientadas que puede provocar dolor o pérdida funcional (Guardado-Gómez et al., 2020).

La regeneración axonal es un proceso complejo en el que participan neuronas, células de Schwann, fibroblastos, células endoteliales y macrófagos. Una vez que la lesión es detectada, la regeneración puede dividirse en tres fases principales. En primer lugar, el extremo proximal del axón lesionado queda expuesto al medio extracelular, lo que provoca un flujo descontrolado de iones sodio y calcio hacia el interior de la célula. Este desequilibrio iónico activa una señal de respuesta que induce el sellado de la membrana plasmática e inicia el proceso de restauración (Guardado-Gómez et al., 2020).

En esta etapa inicial, los nuevos axones que se desarrollan son amielínicos, pero con el tiempo, y gracias a la reorganización de las células de Schwann, se forma la vaina de mielina que recubre y protege la fibra nerviosa. En el extremo del axón se forma una estructura dinámica llamada cono de crecimiento, cuya función es dirigir el rebrote axonal. Este cono utiliza proteínas del citoesqueleto como la actina, junto con proteasas que degradan la matriz extracelular y las barreras de fibrosis generadas por la cicatrización (Guardado-Gómez et al., 2020).

Las células de Schwann también liberan factores neurotróficos esenciales para la supervivencia, elongación y diferenciación de los nuevos axones. Una vez que se establece un trayecto adecuado, se inicia la regeneración funcional del axón, guiada donde estaban las células de Schwann (Guardado-Gómez et al., 2020).

3 CAPÍTULO III: JUSTIFICACIÓN

La regeneración del tejido nervioso es uno de los desafíos más importantes de la neurociencia regenerativa. Los daños al sistema nervioso periférico, como los causados por laceraciones, compresiones, contusiones, daños químicos o tóxicos, isquémicos, inflamatorios, autoinmunes, infecciosos, entre otros; a menudo resultan en efectos permanentes porque la capacidad regenerativa del tejido nervioso es limitada. La consecuencia directa de estas lesiones es una pérdida significativa de funciones motoras y/o sensoriales, que afecta a la calidad de vida del individuo y supone una importante carga económica y social para el sistema sanitario y la sociedad en su conjunto (Abraham, 2020).

El uso de técnicas y procedimientos tradicionales para la a tensión de daños en tejidos nerviosos resulta poco favorable a largo plazo por lo que el uso de biomateriales materiales se vuelve una opción más atractiva por sus propiedades siendo una estrategia prometedora por su potencial para promover la regeneración del tejido nervioso. Estos materiales tienen propiedades únicas que pueden ajustarse para promover el crecimiento neuronal, la migración y la diferenciación celular por su impacto en el microambiente local de la herida (Seyedebrahimi et al., 2019). En el contexto de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, este estudio está directamente relacionado con el Objetivo 3: "Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades". El objetivo de la investigación es sintetizar y caracterizar un nanocompuesto basado en quitosano y nanopartículas de platino mediante la técnica de electrohilado coaxial, con la finalidad de desarrollar un material con alta área de superficie específica, estructura nanofibrosa homogénea y propiedades tales que tenga un potencial uso en regeneración del tejido nervioso a futuro, con la finalidad de proporcionar soluciones que mejoren la calidad de vida de las personas afectadas por daño neuronal y contribuir a la reducción a largo plazo de las desigualdades para un tratamiento médico eficaz y avanzado. A nivel mundial, la ONU reconoce la necesidad de invertir en investigación y desarrollo para abordar los desafíos de salud. Esta investigación representa un esfuerzo en esta dirección, ofreciendo soluciones basadas en nanotecnología a uno de los problemas médicos más desafiantes de la actualidad. En resumen, la investigación propuesta no sólo propone la síntesis de un nanomaterial con potencial uso en regeneración de tejido nervioso, sino que también responde a la necesidad global de soluciones innovadoras para mejorar la salud y el bienestar de la población de acuerdo con los objetivos marcados por la ONU para el año 2030 (Moran, 2023).

4 CAPÍTULO IV: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El sistema nervioso, compuesto por el cerebro, médula espinal y nervios periféricos, es esencial para las funciones vitales, la motricidad y la percepción sensorial del ser humano. Sin embargo, a diferencia de otros tejidos del cuerpo, posee una capacidad intrínseca de regeneración extremadamente limitada (Lin et al., 2008). Cada año, millones de personas en el mundo sufren daños en el sistema nervioso debido a accidentes, enfermedades neurodegenerativas o traumas, llevando a discapacidades permanentes, pérdida de la independencia y una significativa disminución en la calidad de vida.

Las lesiones en el tejido nervioso no solo representan una crisis de salud para el individuo afectado, sino que también imponen una carga económica y social significativa. Los costos asociados con la atención médica continua, rehabilitación y pérdida de productividad laboral son enormes. A esto se suma el impacto emocional y psicológico en los pacientes y sus familias, que a menudo enfrentan situaciones de desesperanza ante la falta de tratamientos efectivos.

Mientras que la medicina ha avanzado en múltiples frentes, la regeneración de tejido nervioso sigue siendo una frontera no conquistada. Las soluciones actuales son limitadas y, en muchos casos, solo apuntan a aliviar los síntomas en lugar de revertir el daño. Las terapias convencionales, como la fisioterapia y los medicamentos, tienen una eficacia variable y no proporcionan soluciones definitivas.

Además, en el marco de la Agenda 2030 de la ONU, se reconoce que el acceso a la salud y el bienestar es un derecho fundamental (Moran, 2023). Sin embargo, los avances en la investigación sobre regeneración nerviosa no son uniformemente accesibles en todo el mundo, creando desigualdades en la atención médica. Esta disparidad en el acceso a tratamientos innovadores refleja una brecha en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Abraham, 2020).

En este contexto, se destaca la necesidad urgente de desarrollar estrategias innovadoras y efectivas para la regeneración del tejido nervioso que puedan ser

implementadas a gran escala y que estén al alcance de todos, garantizando así una vida sana y promoviendo el bienestar global.

5 CAPÍTULO V: HIPÓTESIS

Es posible obtener una membrana de quitosano modificado con nanopartículas de platino (npPt) mediante electrohilado coaxial, logrando una estructura homogénea y estable con potencial uso en regeneración de tejidos.

6 CAPÍTULO VI: OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

Generar un nanocompuesto con la potencial capacidad de regeneración de tejidos a base de Quitosano-npPt obtenidos por electrohilado coaxial.

6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener las fibras de quitosano GMA.
- Sintetizar las nanopartículas de platino.
- Formular las soluciones del nanocompuesto.
- Realizar el electrohilado de las soluciones.
- Caracterizar las fibras obtenidas.

7 CAPÍTULO VII: CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Tabla 1. Cronograma de actividades (Propia autoría).

Mes/Actividad	ene-25	feb-25	mar-25	abr-25	may-25	jun-25	jul-25	ago-25	sep-25	oct-25	nov-25	dic-25
Obtención de fibras de quitosano GMA												
Síntesis de nanopartículas de platino												
Formación del nanocomposito												
Parametros para electrohilado coaxial												
Electrohilado coaxial del nanocompuesto												
Caracterizaciones fisicoquímicas												
Caracterización y análisis SEM												
Pruebas de hinchamiento y degradación												
Actividad antimicrobiana												
Análisis de resultados												
Escritura de tesis												

8 CAPÍTULO VIII: METODOLOGÍA

Para la división de la metodología primero se llevó a cabo la Metacrilación del quitosano mediante la funcionalización vía reacción con metacrilato de glicidilo para introducir grupos funcionales en la cadena de quitosano, posteriormente se prepararon las nanopartículas de platino mediante reducción química, luego se prepararon las soluciones de quitosano a electrohilar en proporción 1:2 de quitosano-GMA con quitosano en ácido acético 0.4M donde se agregaron las nanopartículas de platino al 1% y la solución de PVA al 10% para el núcleo. Las soluciones se electrohicieron siguiendo parámetros de voltaje y distancia del recolector específicas obteniendo las membranas, estas se caracterizaron fisicoquímicamente, además de realizarles pruebas mecánicas y bactericidas.

8.1 MATERIALES

- Quitosano (Sigma-Aldrich, grado biomaterial, 75–85 % de desacetilación)
- Metacrilato de glicidilo (GMA) (Sigma-Aldrich, ≥ 97 %)
- Ácido acético (J.T. Baker, ≥ 99.7 % (ACS))
- Alcohol de polivinilo (PVA) (Sigma-Aldrich, ≥ 99 %, 87–89 % hidrolizado)
- Triton X-100 (Sigma-Aldrich)
- Hidróxido de potasio (KOH) (J.T. Baker, ≥ 85 % (ACS))
- Agua destilada
- Borohidruro de sodio (NaBH_4) (Sigma-Aldrich, ≥ 98 %)
- Acetonitrilo (CH_3CN) (Sigma-Aldrich, ≥ 99.8 % (HPLC))
- Nitrosulfatoplatinato (Alfa Aesar (Thermo Scientific), ≥ 99.9 % (Pt base))
- Etanol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) (J.T. Baker, ≥ 96 %)

8.2 SÍNTESIS DE QUITOSANO-GMA

Se disolvió quitosano al 1 %, en una solución 200mL de ácido acético al 0.4 M, posteriormente se homogeneizó con agitador magnético 12 h a una temperatura ambiente de 25°C. Se adicionó 10 mL hidróxido de potasio (KOH) 5 %, al 15 % de la reacción, y GMA en relación 1:1 con el Quitosano, se le realizaron una serie de 3 enjuagues con 10 mL de ácido acético al 0.4 M a los residuos de hidróxido de potasio y GMA restantes en los vasos de precipitado; se dejó reaccionar con agitación vigorosa durante una hora a $60 \pm 2^\circ \text{C}$ (Flores-Ramírez et al., 2005).

Pasada la hora se colocaron 300 mL de acetonitrilo puro a una temperatura de $40 \pm 2^\circ \text{C}$ con agitación magnética, posteriormente, se co-precipitó agregando gota a gota en series de 3 mL el Quitosano-GMA, obteniendo fibras delgadas de aspecto algodonoso y color blanco, que fueron colocadas en un frasco ámbar con acetonitrilo limpio a temperatura ambiente de 25°C (Flores-Ramírez et al., 2005). Así como se muestra en la figura 6.

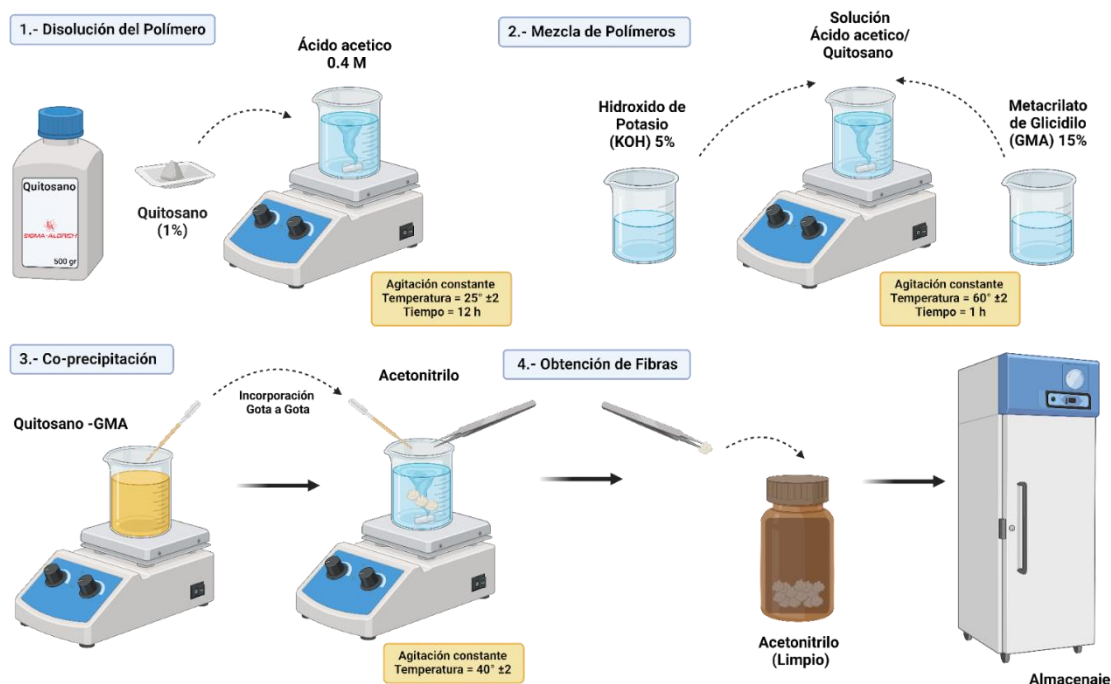


Figura 6. Diagrama del proceso de Metacrilación de quitosano y precipitación en acetonitrilo (Propia autoría, generado mediante Biorender.com).

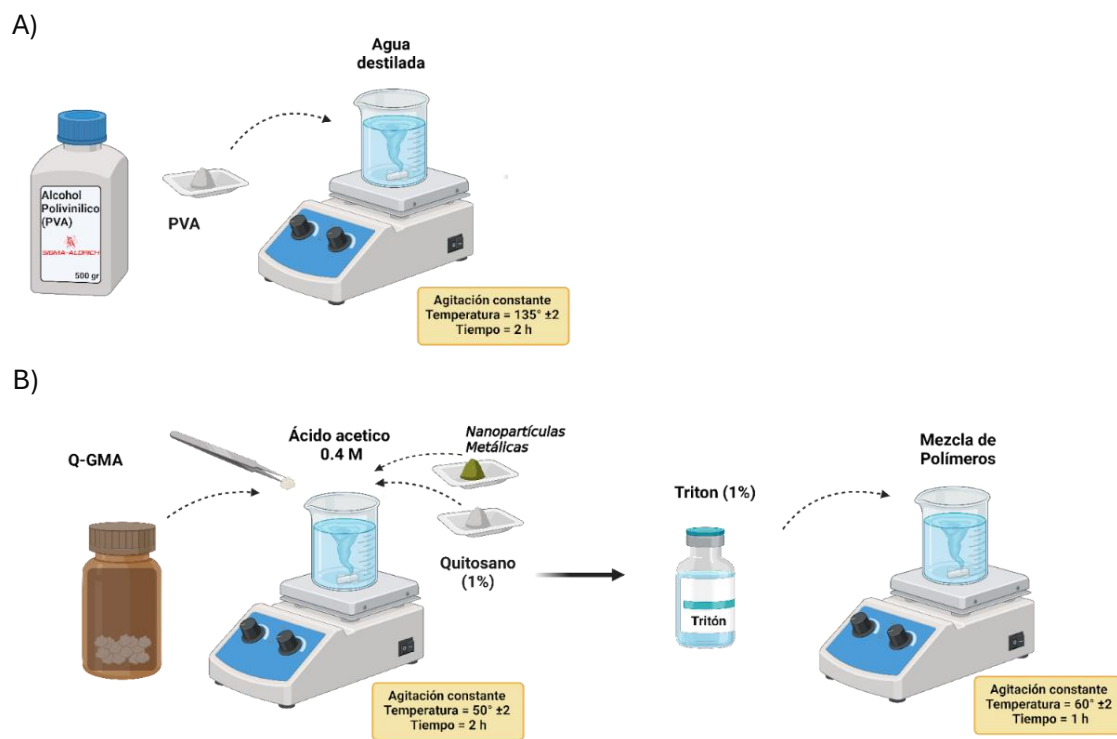
8.3 SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE PLATINO

Se preparó una solución de 25 mL de agua al 0.1% de platino partiendo de una solución de dinitrosulfatoplatinato 5%pt. Se agregaron 50μL de la solución de dinitrosulfatoplatinato hasta un volumen de 25mL de agua destilada que posteriormente se redujo gota a gota con una solución de borohidruro 0.176M. Posteriormente, la solución se dispersó con un sonotrodo para después lavarse con agua destilada y etanol, eliminando así el borohidruro de sodio. Finalmente se secaron hasta conseguir polvos.

8.4 PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES PARA ELECTROHILAR: PVA Y QUITOSANO-NPT

Para la fabricación de las fibras mediante el método de electrohilado se usaron dos soluciones separadas mediante un sistema coaxial que permite la formación de una fibra en dos partes, un núcleo y una cubierta de este. La metodología empleada para la preparación de ambas soluciones se muestra en la figura 7.

- La solución para el núcleo se obtuvo mediante la adición de alcohol polivinilo (PVA) 10% en agua destilada manteniendo la solución en agitación por 2 horas a 135°C hasta homogeneizar y conseguir una solución transparente.
- Para la solución de recubrimiento se tomó el quitosano-GMA al 2% y quitosano al 1%, en el cual se incorporaron las nanopartículas de platino en polvo, disueltos en ácido acético al 0.4 M en agitación constante a 50°C durante 2 horas. Después se adiciona surfactante no iónico (tritón) al 1%.



8.5 PARÁMETROS DEL ELECTROHILADO COAXIAL

Se electrohilieron las soluciones con un electrohilado coaxial, como el de la figura 8, para generar un núcleo y una cubierta en la estructura con una fuente de alto voltaje. La solución se electrohiló coaxialmente usando un rango de voltaje de 23 a 26 kV a un flujo de 0.1 a .6 mL/h a una distancia entre 10 a 15 cm, la película se depositó sobre un recolector fijo.

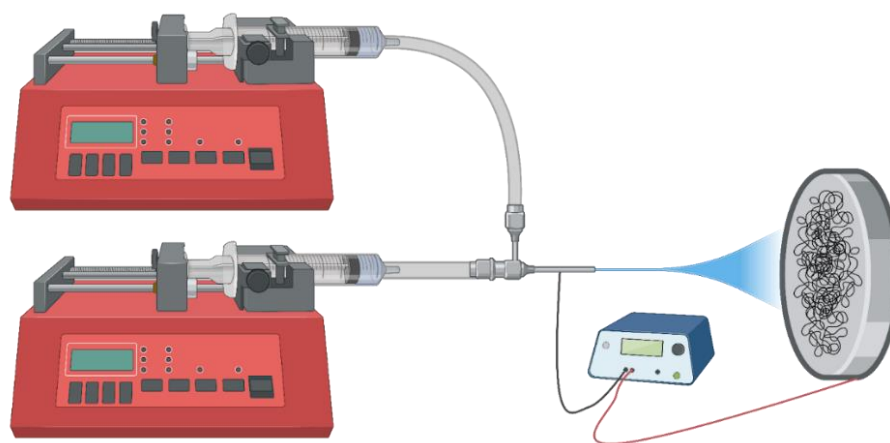


Figura 8. Diagrama del equipo de electrohilado coaxial con recolector fijo (Propia autoría, generado mediante Biorender.com).

8.6 PRUEBAS DE HINCHAMIENTO

Para el grado de hinchamiento de las membranas, se utilizaron muestras de 0.5 cm × 0.5 cm obtenidas a partir de las membranas obtenidas de quitosano y nanopartículas de platino. Estas muestras fueron sumergidas en agua destilada a temperatura ambiente y retiradas en intervalos de tiempo determinados. Al extraerlas de la solución, se manipularon cuidadosamente para preservar su integridad estructural, eliminando el exceso de agua superficial y evitando alterar el hinchamiento real del material.

$$S = \left(\frac{W_s - W_i}{W_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

Se utiliza la ecuación donde W_s es el peso de la membrana hidratada y W_i el peso de la membrana seca.

La prueba de hinchamiento se realiza

8.7 PRUEBA DE DEGRADACIÓN

Para la tasa de degradación de las membranas, se utilizaron muestras de 0.5 cm × 0.5 cm obtenidas a partir de las membranas obtenidas de quitosano y nanopartículas de platino. Estas muestras fueron sumergidas en solución salina tamponada con fosfato, para emular un ambiente biológico real; a temperatura ambiente, retiradas en intervalos de tiempo determinados y secadas en un horno a 40 °C.

$$D = \left(\frac{W_i - W_f}{W_i} \right) \times 100 \quad (2)$$

Se utiliza la ecuación donde W_i es el peso inicial de la membrana y W_f el peso final de la membrana.

8.8 ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA

Se utiliza un método de bocados, en el cual se plaquea un volumen específico a concentración conocida, tanto de nanopartículas como de una disolución de la membrana en agua destilada sobre la superficie del agar. Posteriormente se recorta un bocado del cultivo de *Bacillus subtilis* y se posiciona en el centro de la caja Petri. Las placas se guardan dentro de una incubadora a 37°C, y se registra periódicamente el halo de crecimiento bacteriano.

Para el crecimiento, cultivo y análisis del método de bocados se utiliza agar nutritivo que se prepara a la concentración especificada por el proveedor, se diluye en agua destilada y se esteriliza en autoclave a 121°C y 15 psi durante 15 min para posteriormente hacer el vaciado del agar en cajas Petri con volumen de 15ml aproximadamente.

Con la finalidad de llevar a cabo un crecimiento controlado de *Bacillus subtilis* se utiliza una incubadora con control de temperatura, humedad e iluminación. El espacio de trabajo, materiales, métodos y reactivos es proporcionado por Procobi.

9 CAPÍTULO IX: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1 OBTENCIÓN DE FIBRAS DE QUITOSANO-GMA

Se obtuvieron fibras de quitosano-GMA precipitadas en acetonitrilo, presentando una forma algodonosa de color blanco (Ilustración 6). Tal como se esperaba según la literatura, las fibras mostraron las propiedades previstas bajo las temperaturas y concentraciones establecidas.



Figura 9. Imágenes del proceso de Metacrilación del quitosano: A) Recolección de fibras en acetonitrilo, B) Fibras de quitosano-GMA en frasco ámbar para almacenar, C) Agitación de soluciones de quitosano y D) Precipitado de fibras metacriladas (Propia autoría).

9.2 SINTESIS DE NANOPARTICULAS DE PLATINO

Se obtuvieron las nanopartículas de platino mediante reducción química con borohidruro de sodio usando un polímero (PVP) para evitar la aglomeración de las partículas y conseguir un resultado de tamaño de partícula más homogéneo (Figura 10).



Figura 10. Imágenes del proceso de síntesis de nanopartículas de platino: A) Reducción de dinitrofosfatoplatinato con borohidruro de sodio, B) Sedimento de nanopartículas de platino y C) Solución con nanopartículas dispersas (Propia autoría).

9.3 FORMACIÓN DEL SOLUCIÓN DE QUITOSANO_GMA-nPPT PARA ELECTROHILAR

Para la formación del compuesto a electrohilar se realizaron experimentos con distintas concentraciones de quitosano y quitosano-GMA para encontrar la relación con las mejores propiedades mecánicas para la formación de la película, la relación con las mejores propiedades fue la 2:1 quitosano/quitosano-GMA (Ilustración 8).



Figura 11. imágenes de la formación de soluciones de quitosano con npPt y quitosano_GMA para electrohilar: A) Solución con relación 4:1 y B) Solución con relación 2:1 (Propia autoría).

9.4 MODIFICACIÓN DEL SISTEMA COAXIAL

Para la modificación del sistema coaxial se realizó un modelo 3D para el acople de 2 agujas mostrado en la figura 12, una para la liberación del líquido del núcleo y otra para la capa externa de las fibras, se montó con manguera de grado médico, así como agujas de raquianestesia e hipodérmicas. Para el control del flujo se utilizaron 2 bombas y 2 émbolos cada uno con su solución.

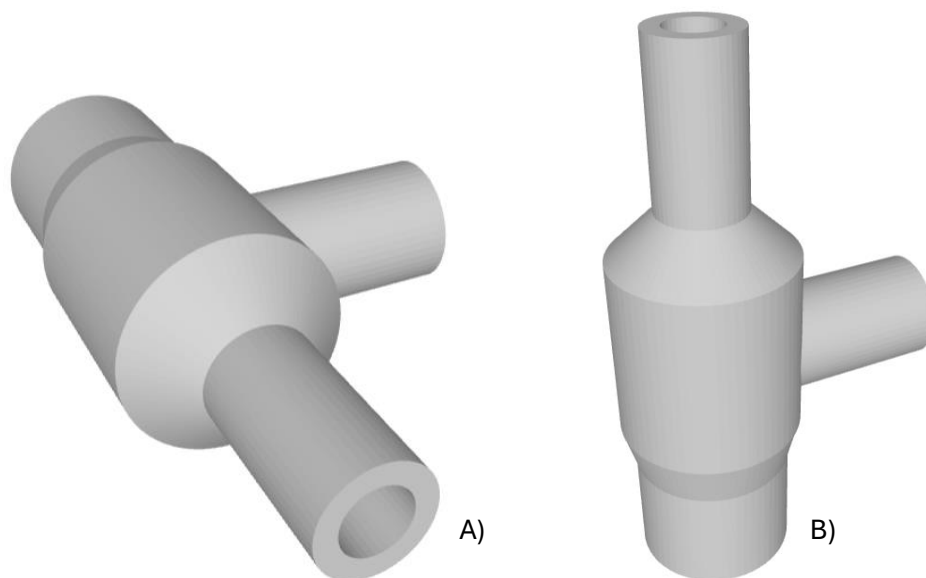


Figura 12. Modelo 3D para el acople del sistema coaxial: A) Vista frontal y B) Vista lateral (Propia autoría, generado mediante autodesk fusion 360).

9.5 ESPECTROSCOPIA DEL ESPECTRO INFRARROJO (IR) DE LAS FIBRAS DE QUITOSANO

El espectro infrarrojo (IR) de la muestra del quitosano (figura 13), presenta varias señales características que permiten identificar sus grupos funcionales y evaluar su estructura. Una banda ancha y fuerte en la región de $3200-3500\text{ cm}^{-1}$ corresponde a los estiramientos de los grupos hidroxilo ($-\text{OH}$) y los enlaces NH del grupo amino, reflejando los enlaces de hidrógeno presentes en su estructura. En la región de $2870-2970\text{ cm}^{-1}$ se observan bandas débiles a moderadas asociadas con los tramos de los enlaces CH , típicos del esqueleto de carbohidratos (Loaiza et al., 2014).

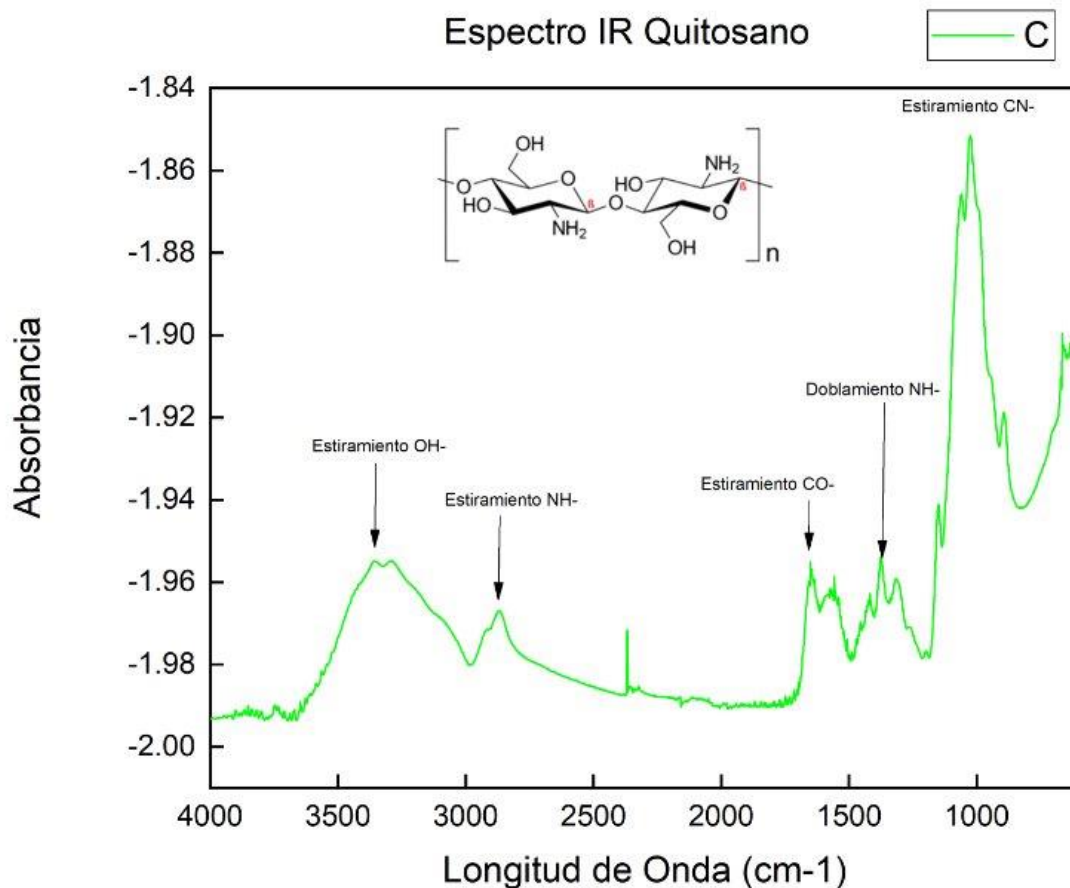


Figura 13. Espectroscopía del espectro infrarrojo correspondientes al rango de 4000 a 500 cm^{-1} , resaltando las señales obtenidas en la muestra de quitosano.

En la zona de 1650-1590 cm^{-1} aparece una banda intensa atribuida a las vibraciones del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) de las amidas ya la flexión del enlace NH en los grupos amino primarios. Estas señales son indicativas tanto de los grupos acetilados como de los grupos aminoácidos libres, fundamentales para calcular el grado de desacetilación (DDA) del quitosano. Asimismo, en 1590-1500 cm^{-1} se encuentra una banda media relacionada con la flexión de los enlaces NH , asociada a los grupos aminoácidos presentes tras el proceso de desacetilación (Zerpa et al., 2017).

En 1420-1470 cm^{-1} se identifica una banda moderada correspondiente a las vibraciones de deformación de los enlaces CH , relacionadas con la estructura del esqueleto del quitosano. Además, las señales intensas en la región de 1000-1250 cm^{-1} se atribuyen a las vibraciones de estiramiento de los enlaces COC y CO ,

características de los grupos éter y alcohol del polisacárido. Por último, en 800-900 cm^{-1} se observan bandas débiles a moderadas asociadas a las vibraciones del esqueleto polisacárido, que representan la estructura general del quitosano (Sierra et al.,2014).

9.6 ESPECTROSCOPÍA UV-VIS DE LAS NANOPARTICULAS DE PLATINO

A diferencia de otros metales nobles como el oro o la plata, las nanopartículas de platino no presentan un pico de absorción definido asociado a un plasmón de superficie localizado, debido a la alta densidad electrónica del platino ya su capacidad de amortiguar eficientemente las oscilaciones colectivas de electrones libres.

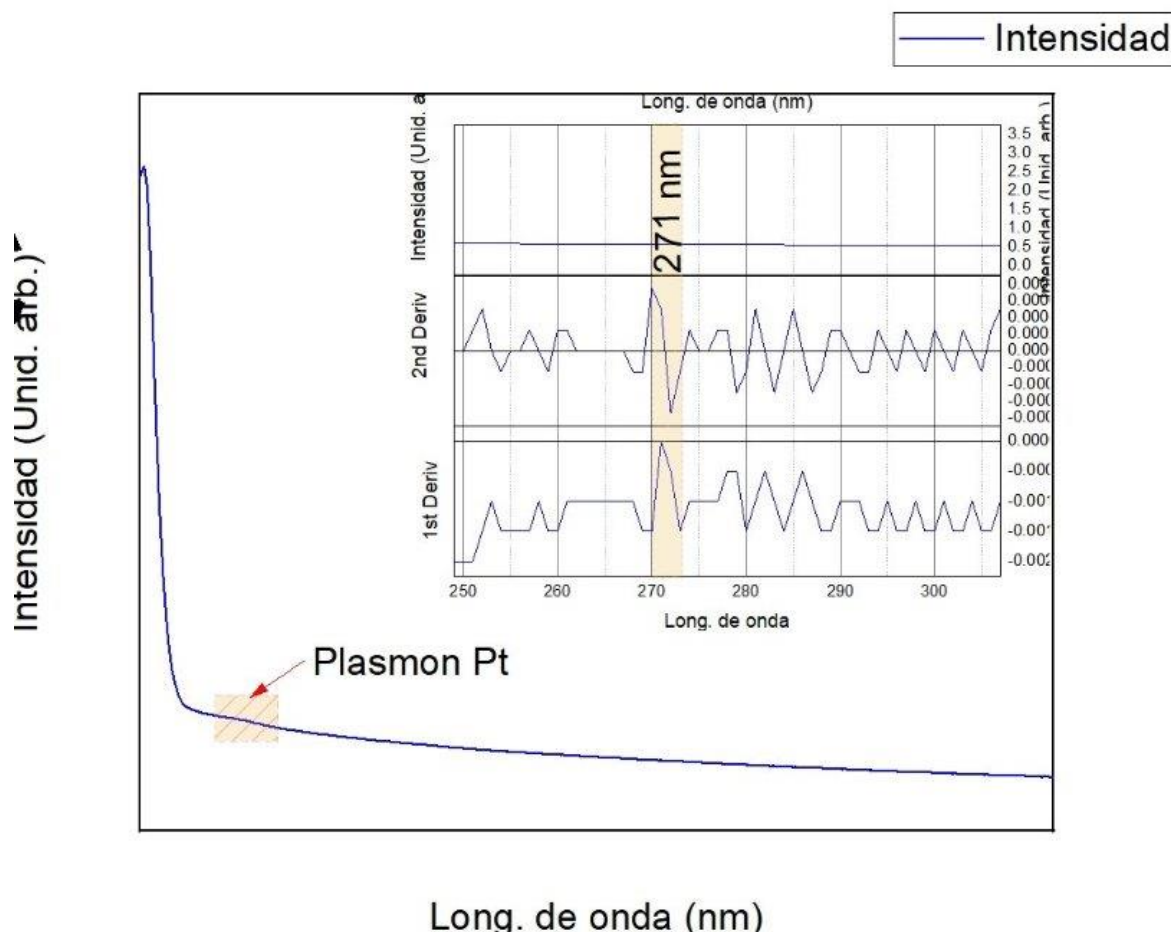


Figura 14. Espectroscopía UV-vis de las nanopartículas de platino.

Sin embargo, las npPt suelen mostrar un patrón de absorción continua que se extiende desde el rango ultravioleta hasta el visible, con una mayor absorción en el rango UV (Figura 14). Este comportamiento es el resultado de las transiciones electrónicas interbanda y las propiedades de dispersión de la luz debido al tamaño y la forma de las nanopartículas. En este caso se puede observar un débil pico de absorción alrededor de 200-250 nm, atribuible a las transiciones electrónicas interbanda, aunque no se considera un plasmón de superficie en el sentido clásico (Cruz et al., 2012).

9.7 DIFRACCIÓN DE LUZ DINAMICA

La técnica de difracción de luz dinámica se utiliza combinada para caracterizar el tamaño hidrodinámico de nanopartículas en solución (Figura 15). En el caso de nanopartículas de platino (PtNPs) con un pico alrededor de 55 nm, el análisis indica que el tamaño promedio de las partículas, incluyendo la capa de solvente y posibles agentes estabilizantes, está en este rango.

Este tamaño hidrodinámico puede ser ligeramente mayor que el tamaño físico de las partículas determinado por técnicas como microscopía electrónica de transmisión (TEM), debido a la influencia del medio dispersante y la posible presencia de capas superficiales de ligandos o estabilizadores que interactúan con las partículas. Un pico bien definido y estrecho en 55 nm sugiere una buena estabilidad coloidal y una distribución de tamaños relativamente uniforme, lo que es indicativo de un proceso de síntesis controlado. Si el pico fuera ancho o se observaran múltiples picos, podría indicar aglomeración, heterogeneidad en los tamaños o la presencia de contaminantes (Monsalve García et al., 2022).

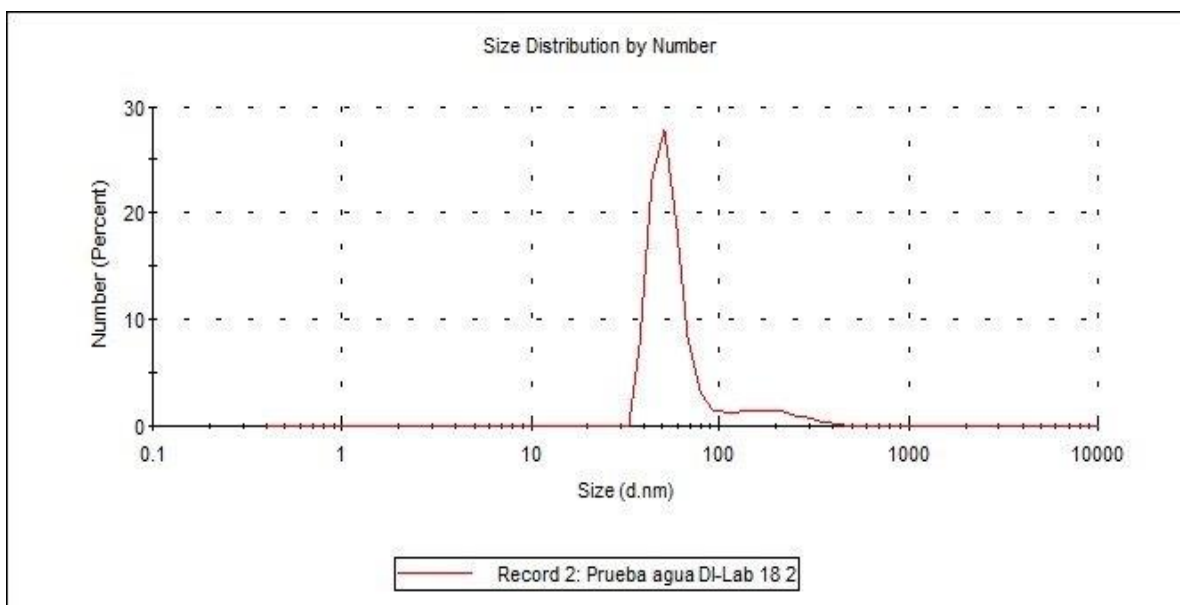


Figura 15. Grafica de distribución de tamaño de nanopartículas de platino en solución obtenida mediante dispersión de luz dinámica.

9.8 ESPECTROSCOPÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X (XRF)

El análisis de fluorescencia de rayos X (XRF) genera un espectro característico con picos de emisión que corresponden a las transiciones electrónicas en los átomos de platino (Figura 16). Los picos más destacados incluyen:

- Pico $L\alpha$: Aparece alrededor de 9,44 keV y es el resultado de la emisión de rayos X desde la capa L del platino, específicamente cuando un electrón cae de la capa M para llenar una vacante en la capa L (Jeong et al., 2024).
- Pico $L\beta$: Se encuentra cerca de 11,07 keV y proviene de una transición entre la capa M y la capa L, aunque con mayor energía que el pico $L\alpha$ (Jeong et al., 2024).
- Pico $K\alpha$ y $K\beta$ (si están presentes): Los picos K son generalmente de menor intensidad y menos frecuentes en nanopartículas pequeñas, ya que depende de la excitación profunda de los electrones de la capa K (Jeong et al., 2024).

El análisis XRF de nanopartículas de platino (PtNPs) confirma la presencia del platino en la muestra y permite estimar buena pureza.

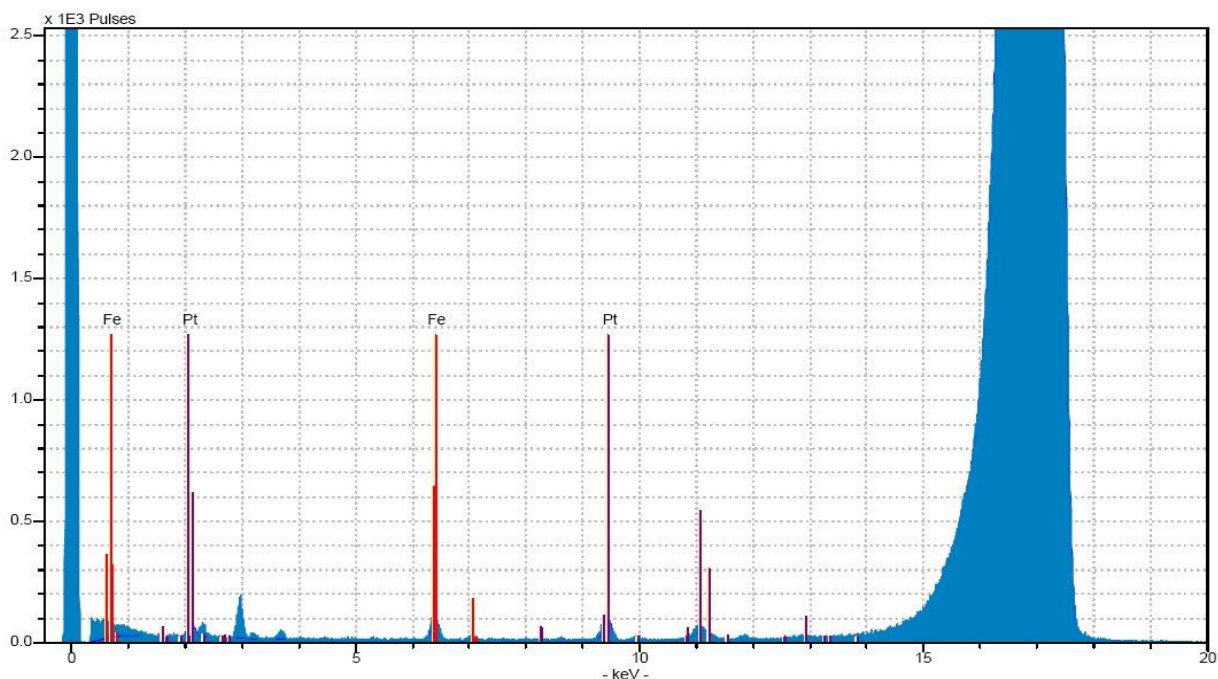


Figura 16. Análisis elemental por XRF de las nanopartículas de platino.

9.9 ANÁLISIS DE PRUEBAS DE HINCHAMIENTO

Se tomaron muestras de membrana de quitosano con nanopartículas de platino y núcleo de alcohol polivinílico de 0.5 x 0.5 cm en tiempos de 0, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4 y 24 h para evaluar su capacidad de absorción de líquidos.

Se realizaron 3 pruebas en las cuales se ve una tendencia a la disminución en el hinchamiento de la película conforme avanza el tiempo. En un inicio se denota un incremento en la absorción de agua debido a las propiedades del PVA y el quitosano pues son materiales hidrofílicos. Además, se denotan picos máximos en 0.5 horas de 962% de hinchamiento donde el promedio fue de 820%, para un valor inicial de tiempo el promedio de hinchamiento es de un 870%. Pasadas las 24 horas se presenta una gran disminución en el porcentaje de hinchamiento de las membranas siendo el valor mínimo promedio registrado de 24.66%.

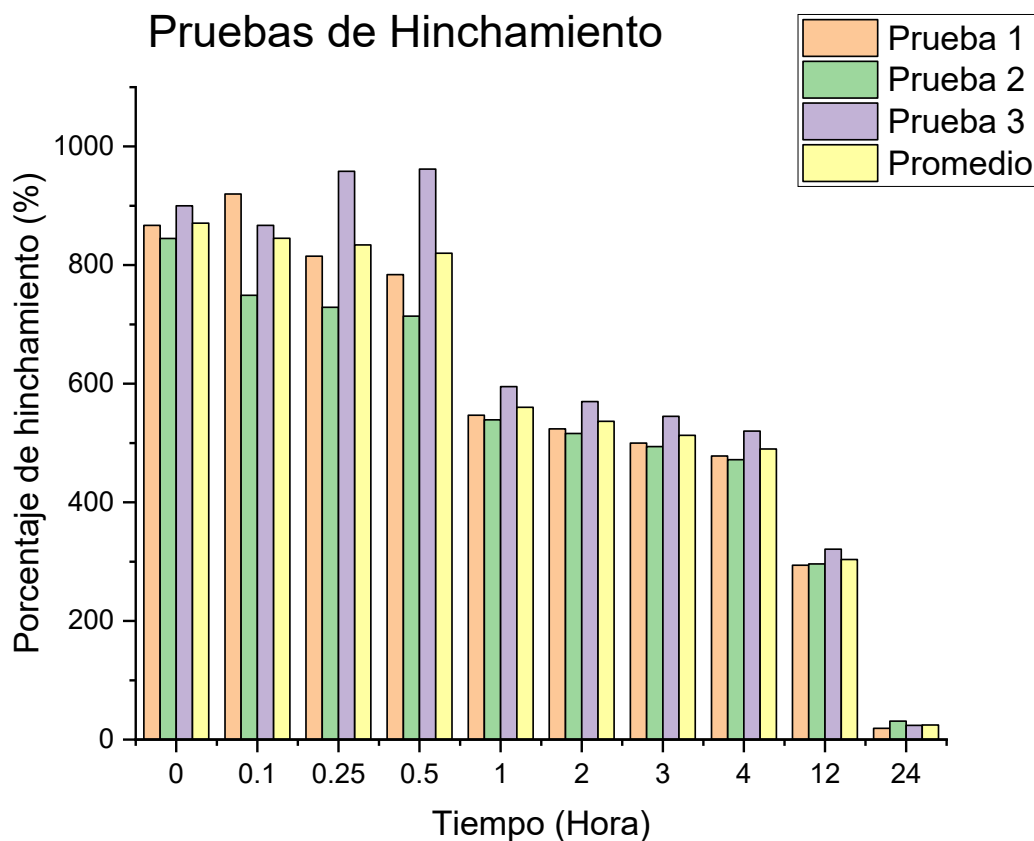


Figura 17. Porcentaje de hinchamiento de membranas electrohiladas desde 0 a 24 horas.

Se muestran puntos de equilibrio de 0.1 a 0.5 horas y de 1 a 4 horas donde la diferencia en el porcentaje de hinchamiento es en promedio de 50% y 70% en donde encontramos puntos de absorción máximos del material o puntos de equilibrio de absorción. A pesar de ser un material con una gran capacidad de hinchamiento inicial se puede apreciar su disminución al paso de 24 horas lo que podría indicar una deformación estructural o colapso de la red polimérica debido a la disolución del polímero en la solución. La adición de nanopartículas de platino también influye en la capacidad de absorción de líquidos del material ya aumenta la densidad en la red polimérica.

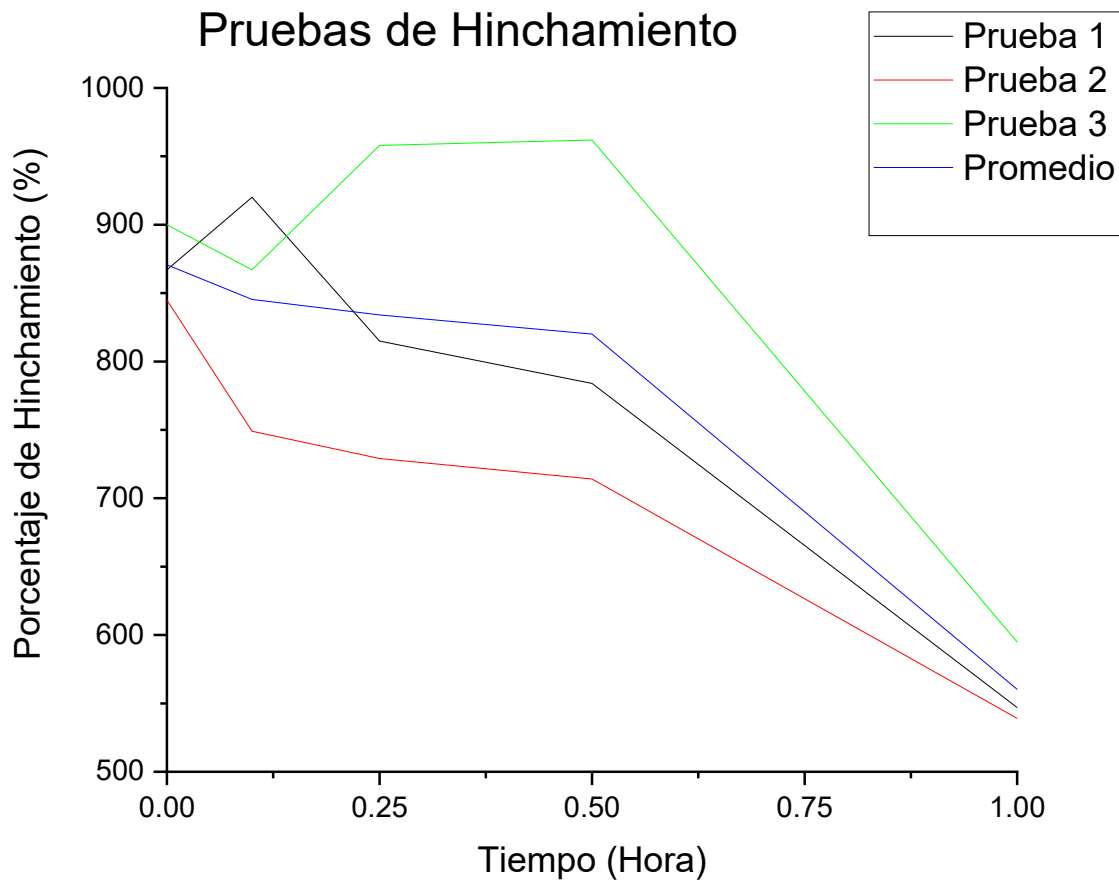


Figura 18. Porcentaje de hinchamiento de membranas electrohiladas de 0 a 1 hora.

9.10 ANÁLISIS DE PRUEBAS DE DEGRADACIÓN

Se tomaron muestras de membranas de quitosano con nanopartículas de platino y núcleo de alcohol polivinílico de 0.5 x 0.5 cm en tiempos de 0, 0.5, 1, 2, 3, 5 y 7 días para evaluar su degradación en función del tiempo de exposición.

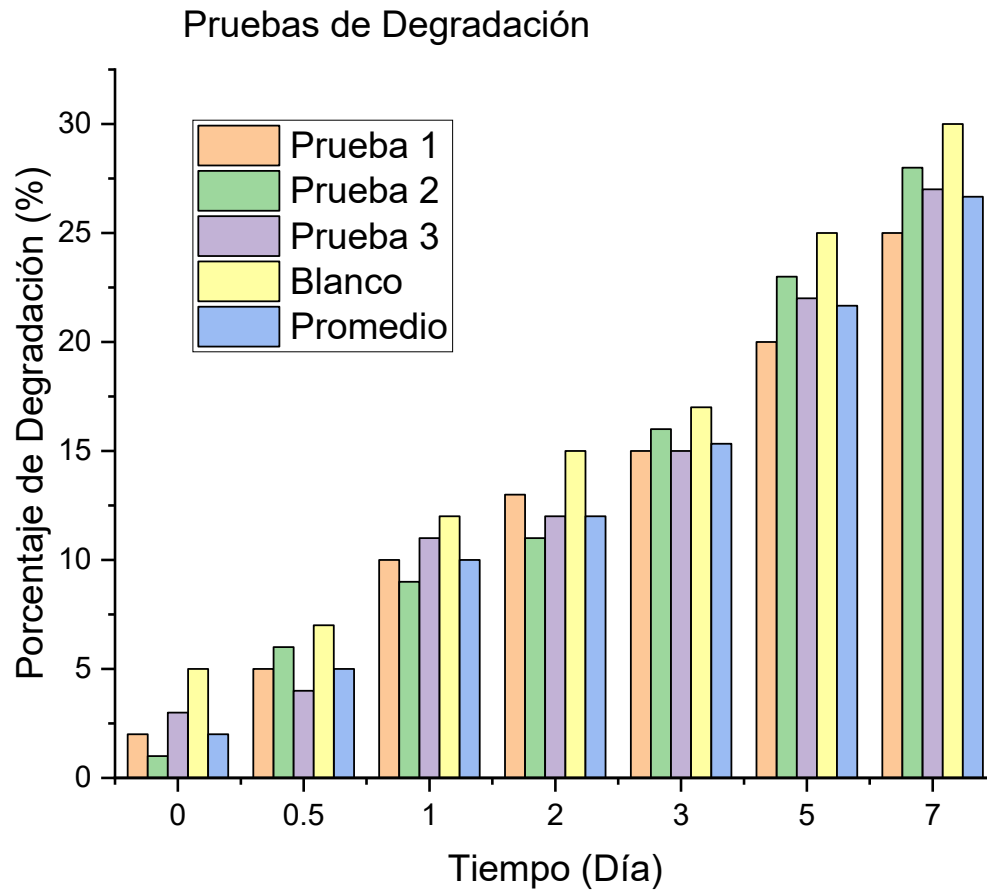


Figura 19. Porcentaje de degradación de membranas electrohiladas desde 0 a 7 días.

Se realizaron 3 pruebas, un blanco sin nanopartículas de platino y se grafica el promedio de las pruebas realizadas en donde se ve una pérdida de masa lo que indica una tasa de degradación que aumenta conforme se aumenta el tiempo de exposición al medio fisiológico simulado, esta pérdida de masa se puede deber a la hidrólisis de los enlaces glucosídicos del quitosano, a la disolución del PVA en el medio o a la deformación de la estructura en la matriz. Además, se puede observar que dentro de las primeras 24 horas, así como en el último día hay una diferencia considerable entre las muestras y el blanco, lo que sugiere un retardo en la degradación de la película debido a las nanopartículas de platino.

La degradación podría estar dada en 3 pasos principales donde las cadenas de los polímeros superficiales se degradan primero, seguido del PVA y por último la descomposición de las cadenas principales del quitosano. El promedio de

degradación presenta una ventana de oportunidad para una posible liberación controlada de fármaco diluido en el PVA de la matriz.

9.11 MICROSCOPIA OPTICA DE LAS MEMBRANAS

En la fotografía tomada con microscopio óptico (Ilustración 14), se observa un ordenamiento preferencial de las fibras a escala macroscópica, lo que sugiere una disposición bien organizada de los componentes en la matriz. Las fibras de quitosano, que constituyen la base de la estructura, muestran una disposición homogénea y alineada, lo que indica un proceso de fabricación controlado. Además, se puede identificar claramente la presencia de trazas de embebido dentro de la matriz de quitosano, lo que refleja una integración eficiente de las nanopartículas de platino en la estructura sin aglomeraciones visibles. La imagen también revela que no se presentan malformaciones ni defectos estructurales notables, como espacios vacíos o discontinuidades, en la superficie inmediata de las fibras. Esto sugiere que la matriz se mantiene estable y uniforme, con una distribución coherente tanto de las fibras como de las nanopartículas de platino, lo cual es crucial para aplicaciones en áreas como la regeneración de tejidos, donde la homogeneidad y la integridad.

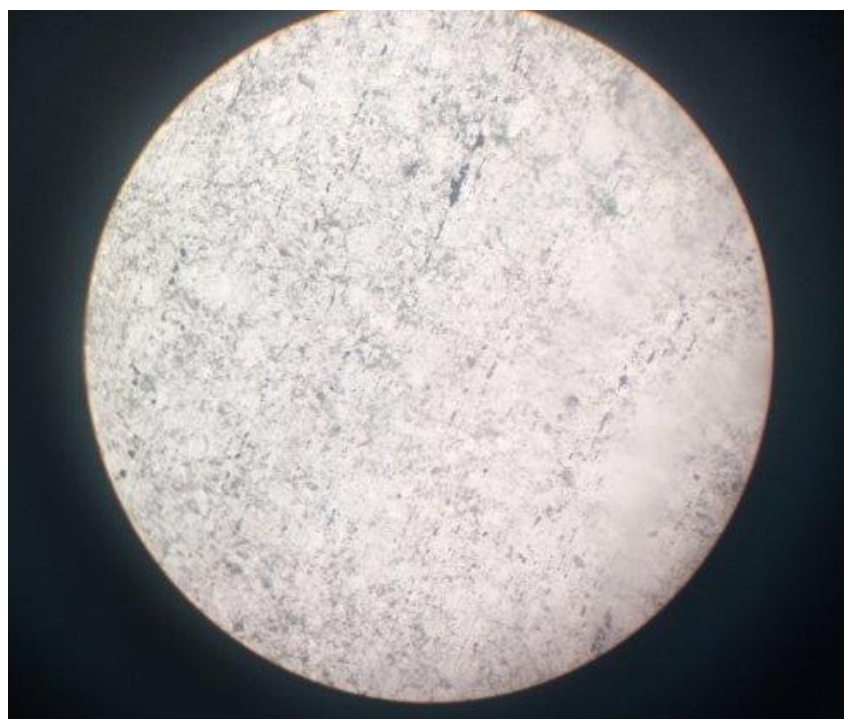


Figura 20. Imagen de membrana electrohilada obtenida mediante Microscopía óptica a 100x.

9.12 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

Las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de fibras de quitosano coaxialmente electrohiladas con nanopartículas de platino muestran una estructura bien definida y altamente detallada (Ilustración 15). Las fibras, que tienen un diámetro en el rango de 160 a 254 nm, presentan una morfología uniforme, con una distribución regular de tamaños a lo largo de toda la muestra. La técnica de electrohilado coaxial ha permitido que las fibras se alineen de manera precisa, lo que proporciona una alta estabilidad estructural a la matriz.

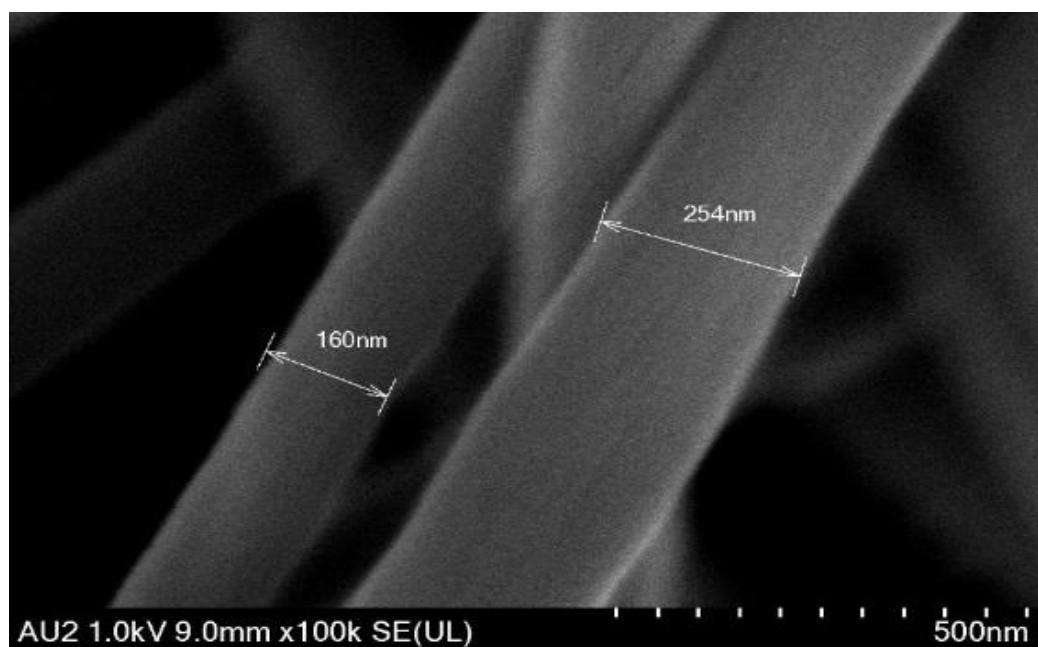


Figura 21. Micrografía MEB de la membrana electrohilada con amplificación 100,00x.

En las imágenes SEM, se puede observar poca cantidad de nanopartículas de platino dispersas de manera eficiente sobre la superficie de las fibras, sin aglomeraciones notables. El tamaño de las nanofibras oscila entre 160 nm y 254 nm, lo que sugiere que el proceso de electrohilado ha logrado controlar tanto el tamaño de las fibras dentro de la estructura. Las micrografías también permiten evaluar la calidad de la técnica de electrohilado, mostrando que no hay signos de defectos significativos, como la formación de huecos o malformaciones en la superficie de las fibras. Esto refleja una buena calidad en la preparación de las fibras y su potencial aplicación en áreas como la regeneración de tejidos, donde se requieren estructuras incompatibles y con propiedades funcionales específicas.

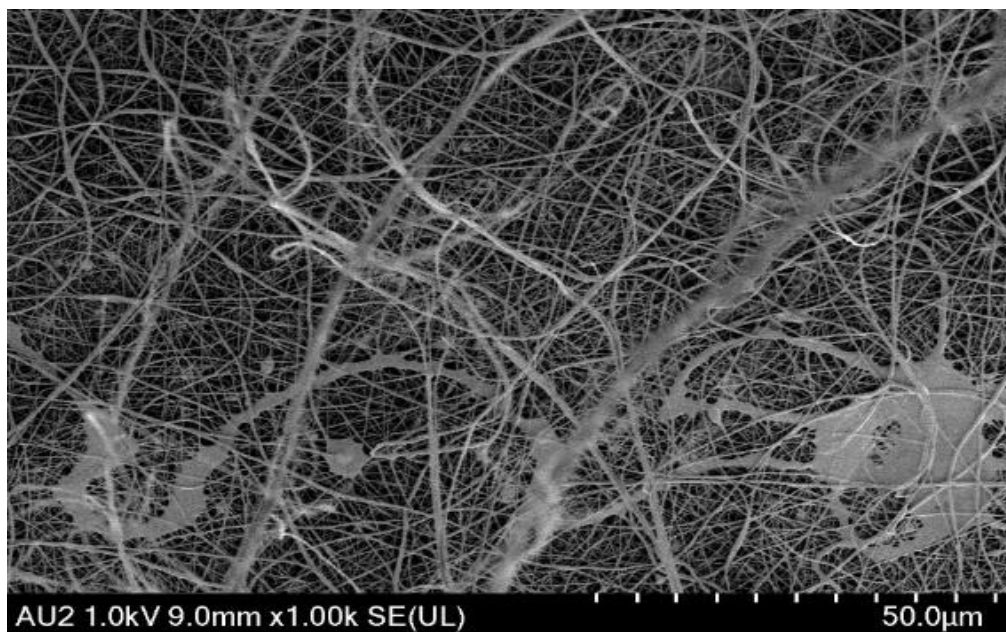


Figura 22. Micrografía MEB de la membrana electrohilada con ampliación 1,000x.

9.13 ANÁLISIS DE ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA

Para la prueba se utilizaron: un blanco, controles de cada material, una muestra de nanopartículas 100 y 10-1, una muestra de película de quitosano GMA con nanopartículas 10-1 y 10-2; ambas por duplicado, plaqueando un volumen de 20μl sobre la superficie del agar nutritivo.

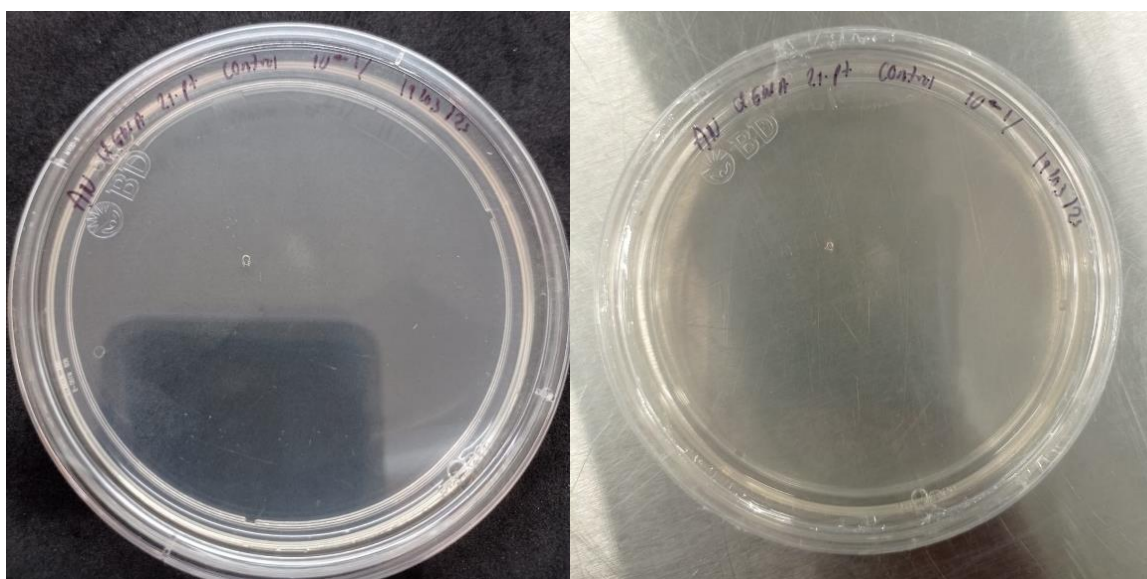


Figura 23. Muestras control de las diluciones de las membranas con nanopartículas y sin nanopartículas.

Para el control de la película de quitosano GMA con PVA y nanopartículas de platino, se plaqueo una solución del volumen establecido en la superficie del agar nutritivo, en la cual no se mostró ningún crecimiento bacteriano ni fúngico durante un periodo de observación de 7 días. Para el control de la solución de nanopartículas en agua destilada sin diluir, se realizó el mismo procedimiento donde de igual forma no se dio el crecimiento de ninguna colonia durante un periodo de 7 días. Esto indica que el método de síntesis que se llevó a cabo, tanto de las nanopartículas como el de la película, está libre de contaminación biológica.

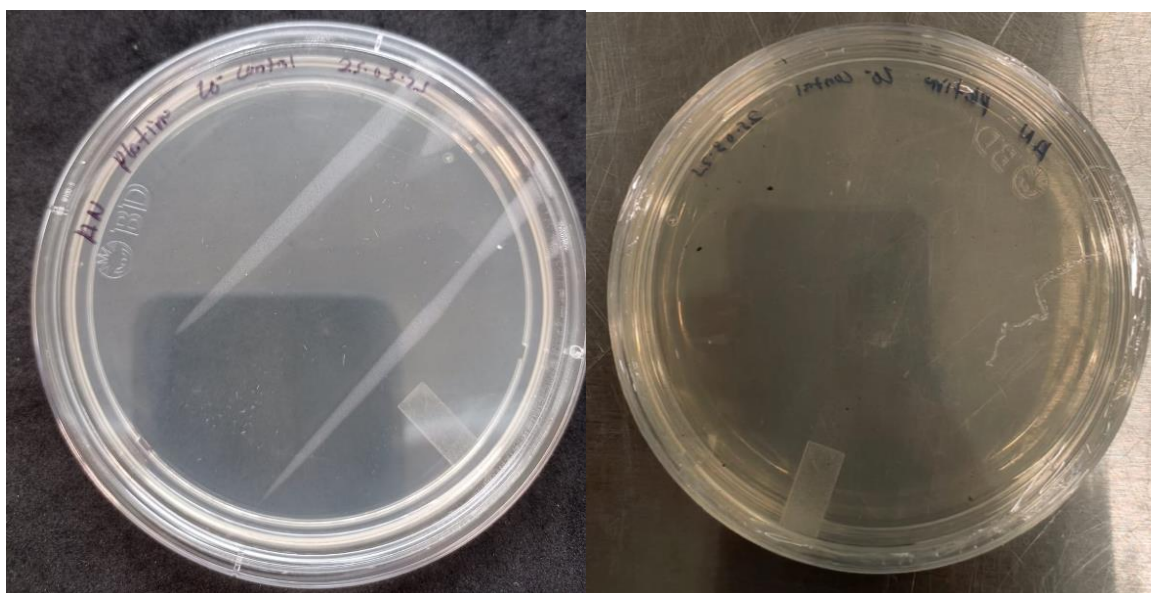


Figura 24. Muestras control de diluciones de dispersión de nanopartículas de platino.

En la interacción del bocado de *Bacillus subtilis* se muestra el crecimiento de la bacteria y su interacción con el material plaqueado sobre la superficie del agar nutritivo, mostrando un mayor crecimiento en concentraciones bajas de la película y de la solución de nanopartículas de platino.

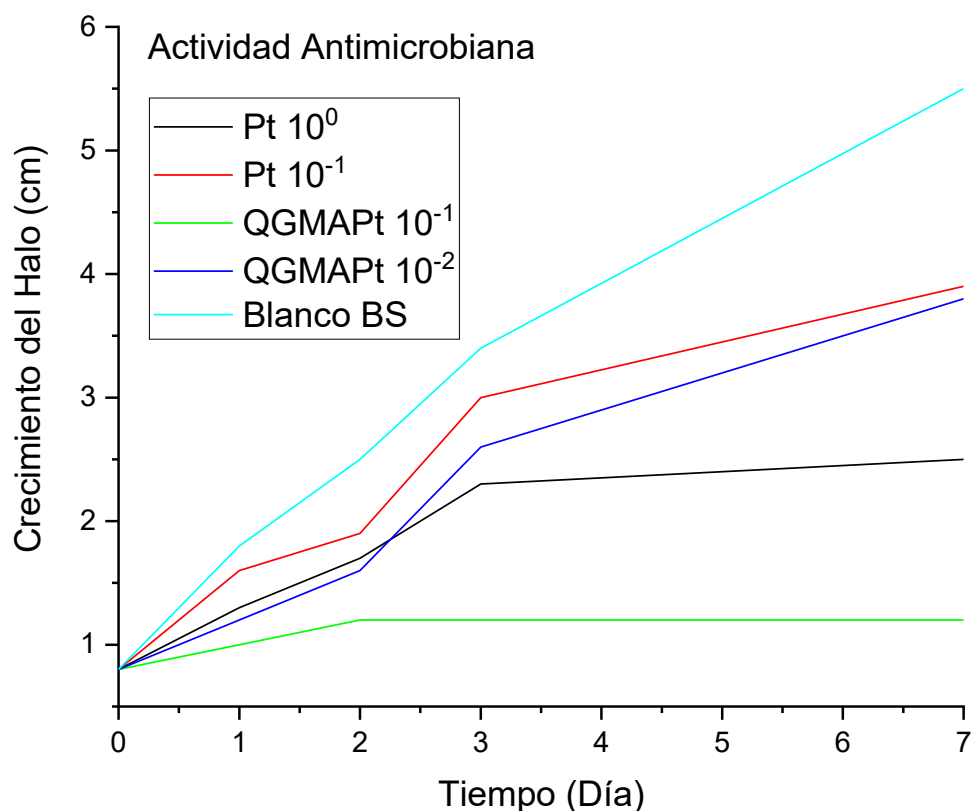


Figura 25. Gráfica de crecimiento del halo en prueba de actividad microbiana.

Se denota una diferencia en el crecimiento de *Bacillus subtilis* en el blanco comparado con la solución de la película de quitosano GMA y nanopartículas de platino, donde después del día 2 ya no se presenta un aumento del halo de crecimiento bacteriano, esto es de esperarse ya que los materiales constituyentes del nanocompuesto presentan alta actividad antimicrobiana. Tomando como referencia las pruebas realizadas con la solución de nanopartículas de platino, se esperaba una actividad menor en ellas, ya que *Bacillus subtilis* es una bacteria Gram positiva y las nanopartículas de platino presentan una mejor actividad antimicrobiana contra bacterias Gram negativas según la literatura.

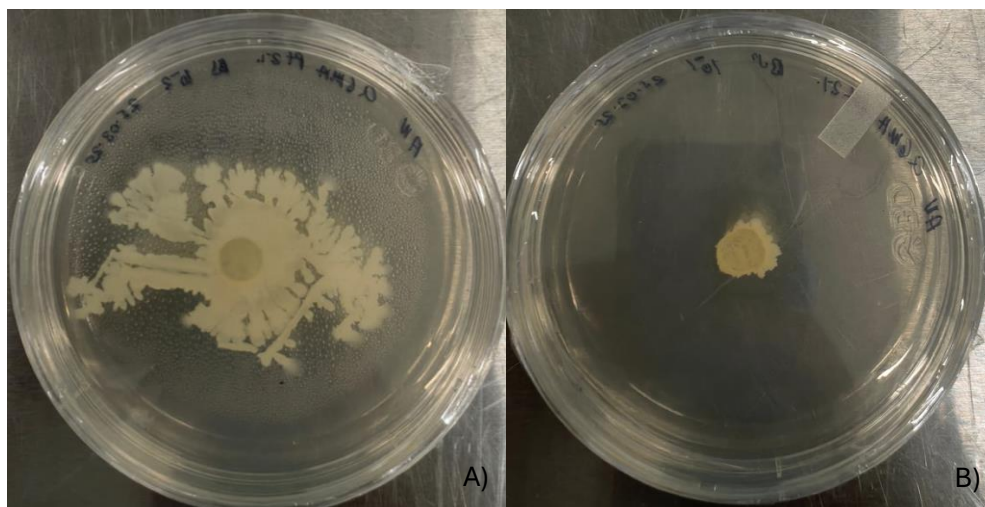


Figura 26. imágenes del crecimiento de *Bacillus subtilis* en: A) Control sin material y B) Dilución de membrana.

10 CAPÍTULO X: CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se realizó la síntesis y desarrollo de un nanocompuesto a base de quitosano con nanopartículas de platino mediante la técnica de electrohilado coaxial, obteniendo un material con núcleo de alcohol polivinílico, para esto la modificación mediante el uso de metacrilato de glicidilo resultó en fibras esponjosas de color blanco que permitieron la formación de las soluciones electrohiladas, se obtuvieron las nanopartículas mediante reducción química con borohidruro de sodio, se electrohilieron las soluciones bajo los parámetros propuestos, obteniendo morfologías reticuladas esperadas y fibras uniformes, estas fibras pudieron ser caracterizadas fisicoquímicamente y realizarse pruebas de actividad antimicrobiana.

En este trabajo de investigación se llevó a cabo la síntesis y el desarrollo de un nanocompuesto a base de quitosano modificado con glicidil metacrilato y nanopartículas de platino, obtenido mediante la técnica de electrohilado coaxial. El sistema desarrollado presentó una estructura con núcleo de alcohol polivinílico, como apoyo para la mejora de los parámetros del electrohilado de las soluciones.

La modificación química del quitosano mediante glicidil metacrilato permitió mejorar su procesabilidad, favoreciendo la formación de soluciones adecuadas para el electrohilado y la obtención de fibras nanométricas con morfología homogénea. Por lo que se obtuvieron fibras esponjosas de color blanco, continuas y uniformes, las cuales facilitaron la integración de las nanopartículas dentro de las soluciones electrohiladas.

Las nanopartículas de platino se sintetizaron mediante la reducción química con borohidruro de sodio, logrando partículas con distribución de tamaño uniforme y estabilidad adecuada para su incorporación en el nanocompuesto. Posteriormente, las soluciones poliméricas se electrohilieron bajo los parámetros establecidos, obteniéndose membranas nanofibrosas con morfologías reticuladas y diámetros uniformes, consistentes con los requerimientos estructurales para aplicaciones en regeneración de tejidos.

Las membranas obtenidas fueron caracterizadas mediante técnicas fisicoquímicas, se llevaron a cabo ensayos de actividad antimicrobiana pudiendo destacar lo siguiente de cada análisis particular realizado al material:

- Caracterización de las nanopartículas:
 - Difracción de luz dinámica (DLS): El análisis confirmó una distribución uniforme de tamaño de las nanopartículas de platino, con diámetros promedio adecuados para mantener su estabilidad y funcionalidad dentro de la matriz de quitosano.

- XRF (Fluorescencia de rayos X): La caracterización química verificó la pureza y composición elemental de las nanopartículas de platino, asegurando su funcionalidad esperada en términos de biocompatibilidad y propiedades catalíticas.
- Morfología de las fibras de la película (SEM):
 - El análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) evidenció la formación de fibras uniformes con diámetros promedio de 160 nm, una dimensión óptima para la interacción celular y la orientación axonal en tejidos nerviosos.
 - Las fibras mostraron una integración adecuada entre el quitosano, el núcleo de PVA y las nanopartículas, lo que asegura estabilidad estructural y funcionalidad.
- Propiedades del quitosano como matriz principal:
 - La modificación química con GMA y la adhesión de nanopartículas de platino mejoran la capacidad de Hinchamiento de las membranas lo que junto a la estructura y propiedades de biocompatibilidad del nanocompuesto; proporciona un entorno favorable para el posible crecimiento de células nerviosas.
 - La flexibilidad mecánica del núcleo de PVA permitió la formación de una película resistente que se puede electrohilar con parámetros más cómodos de electrohilado y la adhesión de nanopartículas a la matriz muestra una resistencia a la degradación óptima.
- Actividad antimicrobiana:
 - Se muestra una gran actividad antimicrobiana en bacterias gram positivas, tanto para las nanopartículas de platino y el nanocompuesto en forma de película delgada.
 - Se muestra una capacidad de síntesis de las nanopartículas y de la película delgada libre de contaminación biológica.

- Aplicación en regeneración de tejidos:
 - La combinación de biocompatibilidad, propiedades antimicrobianas, hinchamiento y tasa de degradación de las nanopartículas de platino en la matriz de quitosano muestra un gran potencial para estimular la regeneración de tejidos nerviosos.
 - Los resultados sugieren que esta película podría integrarse en aplicaciones biomédicas avanzadas, como injertos nerviosos o plataformas de cultivo celular para el estudio de enfermedades neuronales.

Finalmente, se puede concluir de este trabajo de investigación que el objetivo general propuesto se concretó ya que se obtuvo una membrana con una estructura fibrosa, mediante el método de electrohilado coaxial, con lo que se favorece la arquitectura de una estructura core-shell homogénea y estable, la cual exhibe capacidades antibacterianas, además de una morfología reticular en la matriz de quitosano como fase continua con nanopartículas de platino embebidas en la matriz lo que mostro buenas capacidades de sus propiedades de hinchamiento y degradación; Características que lo vuelven un material con gran potencial para su aplicación como andamio para la en la regeneración de tejidos con baja capacidad de restauración celular debido a la complejidad de su microambiente.

11 CAPÍTULO XI: PERSPECTIVAS FUTURAS

- Ensayos in vitro: Se requiere probar el material en un ambiente controlado con alguna línea celular afín o con las características necesarias para evaluar su acción en la viabilidad celular del tejido nervioso.
- Ensayos in vivo: Se requiere validar los resultados obtenidos en sistemas biológicos más complejos para evaluar la respuesta del tejido nervioso en organismos vivos.
- Caracterización mediante Microscopía electrónica de Transmisión: con la finalidad de evaluar la estructura core-shell presente.
- Optimización de costos: Investigar métodos alternativos de síntesis de nanopartículas y escalado para aplicaciones industriales.
- Mejora en propiedades mecánicas: Incorporar otros aditivos o ajustar las proporciones para maximizar la elasticidad y resistencia de la película.

12 CAPÍTULO XII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraham, G. A. (2020, 3 diciembre). Matrices electrohiladas híbridas de PCL/quitosano con vidrio bioactivo para ingeniería de tejidos óseos. <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmlui/handle/123456789/475>
- Aghaie, T., Jazayeri, M. H., Manian, M., Khani, L., Erfani, M., Rezayi, M., Ferns, G. A., & Rezayi, M. (2018). Gold nanoparticle and polyethylene glycol in neural regeneration in the treatment of neurodegenerative diseases. *Journal of Cellular Biochemistry*, 120(3), 2749-2755. <https://doi.org/10.1002/jcb.27415>
- Aguilar Cuevas, O., Castro Ramírez, R., Sánchez García, J. J., López-Sandoval, H., & Barba-Behrens, N. (2012). Química Inorgánica Medicinal: vanadio, platino, oro. *Educación química*, 23(1), 33-40.
- Alzahrani, S. O., Alisaac, A., Alsahag, M., Aldosari, F. M., Alshammari, N. M., Alhalafi, M. H., Obaid, A. O., & El-Metwaly, N. M. (2025). Green synthesis, characterization, phytochemical analyses, and antibacterial evaluation of Ag/TiO₂ and Ag/TiO₂-chitosan nanocomposites derived from *M. chamomilla*. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 144220. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144220>
- Aman, A. F., Ghazy, O. A., Saleh, H., Ali, I. A., Ahmed, N. H., Rizk, S. A., & Ali, Z. I. (2025). Enhanced Biomedical Performance of Magnetic Fe₃O₄@chitosan Nanocomposites: A Comparative Study of Synthesis Methods for Hyperthermia and Chemotherapy Applications. *JCIS Open*, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.jciso.2025.100142>
- Anjum, A., Garg, R., Kashif, M., & Eddy, N. O. (2023). Nano-scale innovations in packaging: Properties, types, and applications of nanomaterials for the future. *Food Chemistry Advances*, 3, 100560. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100560>
- Aranaz, I., Alcántara, A. R., Civera, M. C., Arias, C., Elorza, B., Heras Caballero, A., & Acosta, N. (2021). Chitosan: An overview of its properties and applications. *Polymers*, 13(19), 3256.
- Aristizábal-Fúquene, A. (2015). El platino: contribuciones sociohistóricas y científicas desde el siglo XVIII. Parte I. *Educación química*, 26(2), 146-151.
- Arumugam, M., Murugesan, B., Chinnalagu, D. K., Cai, Y., Malliappan, S. P., Balasekar, P., Rengasamy, G., Chinniah, K., & Mahalingam, S. (2024). Multifunctional silk fibroin and cellulose acetate composite nanofibers incorporated with palladium and platinum nanoparticles for enhanced wound healing: Comprehensive characterization and in vivo assessment. *Colloids And Surfaces A Physicochemical And Engineering Aspects*, 684, 133153. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133153>
- Aulia, S. P., Nadia, A., Annas, D., Marlinda, L., Madiabu, M. J., Ndruru, S. T. C. L., Marlina, A., Khoiriah, K., Sisca, V., 'Adany, F., Amin, A. K., Muttaqii, M. A., Syauqi, M. I., Ditalistya, T., Tozuka, Y., Kadota, K., Kämäräinen, T., & Nugroho, R. W. N. (2025). Sustainable Green Synthesis of CoFe₂O₄/TiO₂

Magnetic Nanocomposites Using *Parkia speciosa* (Stinky Bean) Peel Extract as an Electrocatalyst for Hydrogen Production. *Vacuum*, 114378. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114378>

- Barbeito, C. G., Falcón, J. E., Magallanes, V., & Diessler, M. E. (2022). Tejido nervioso y sistema nervioso. Libros de Cátedra.
- Boecker, A., Däschler, S. C., Kneser, U., & Harhaus, L. (2019). Relevance and recent developments of chitosan in peripheral nerve surgery. *Frontiers in cellular neuroscience*, 13, 104.
- Caballero, A. R. (2018). El tejido nervioso. *Morfolia*, 10(2), 27-32.
- Carvalho, C., López-Cebral, R., Silva-Correia, J., Silva, J. M., Mano, J. F., Silva, T. H., Freier, T., Reis, R. L., & Oliveira, J. M. (2017). Investigation of cell adhesion in chitosan membranes for peripheral nerve regeneration. *Materials* [sihttps://doi.org/10.1016/j.msec.2016.11.100](https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.11.100)
- Cold Spring Harbor Perspectives in Biology. (s. f.). <https://cshperspectives.cshlp.org/>
- Corona, B. E. H. (2021). Introducción al Sistema Nervioso. Universidad de Guanajuato.
- Cruz, D. A., Rodríguez, M. C., López, J. M., Herrera, V. M., Orive, A. G., & Creus, A. H. (2012). Nanopartículas metálicas y plasmones de superficie: una relación profunda. *Avances en ciencias e ingeniería*, 3(2), 67-78.
- Da Silva, A. B., Rufato, K. B., De Oliveira, A. C., Souza, P. R., Da Silva, E. P., Muniz, E. C., Vilsinski, B. H., & Martins, A. F. (2020). Composite materials based on chitosan/gold nanoparticles: from synthesis to biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 161, 977-998. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.113>
- Darwesh, O. M., Abdelmaksoud, N. M., & El-Bakry, A. M. (2024). Nano-chitosan as a bio-enhancer for improving insecticide formulations: A study on indoxacarb and methomyl against cotton leafworm. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 282, 137465. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137465>
- De Maria Aguiar Carvalho, C., Da Silva, B. B., Brianezi, S. F. S., Sanfelice, R. C., Balogh, D. T., Assis, L., Tim, C. R., & Pavinatto, A. (2025). Chitosan-based structures for skin repair: A literature review. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 141426. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141426>
- Domszy, J. G., & Roberts, G. A. (1985). *Die Makromolekulare Chemie*, 186(8), 1671–1677. <https://doi.org/10.1002/macp.1985.021860815>
- Egas Ribadeneira, D. (1998). Microscopía Electrónica: Fundamentos, Teoría y Aplicaciones (Bachelor's thesis, Quito: EPN, 1998)
- Ekrami-Kakhki, M.-S., Naeimi, A., & Donyagard, F. (2019). Pt nanoparticles supported on a novel Electrospun Polyvinyl Alcohol-Cuo CO3O4/Chitosan based on *Sesbania* SESBAN plant as an electrocatalyst for direct methanol fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(3), 1671–1685. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.102>

- Ellis-Behnke, R. (2007). Nano Neurology and the Four P's of Central Nervous System Regeneration: Preserve, Permit, Promote, Plasticity. *Medical Clinics Of North America*, 91(5), 937-962. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2007.04.005>
- El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Alkafaas, S. S., Dladla, M., Ghosh, S., Elkafas, S. S., Hafez, W., Ezzat, S. M., Khedr, S. A., Hussien, A. M., Fahmy, M. A., Elesawi, I. E., Salem, H. M., Mohammed, D. M., El-Mageed, T. A. A., Ahmed, A. E., Mosa, W. F. A., El-Tarabily, M. K., AbuQamar, S. F., & El-Tarabily, K. A. (2025). Chitosan, derivatives, and its nanoparticles: Preparation, physicochemical properties, biological activities, and biomedical applications – A comprehensive review. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 142832. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142832>
- Flores-Ramírez, N., Elizalde-Peña, E. A., Vásquez-García, S. R., González-Hernández, J., Martínez-Ruvalcaba, A., Sánchez, I. C., Luna-Bárcenas, G., & Gupta, R. B. (2005). Characterization and degradation of functionalized chitosan with glycidyl methacrylate. *Journal of Biomaterials Science-polymer Edition*, 16(4), 473-488. <https://doi.org/10.1163/1568562053700174>
- Gallegos-Hernández, G. F. (2018). Ensayos colorimétricos para la detección de citotoxicidad. *Vidsupra*, 10(1), 1-55.
- Glavee, G. N., Klabunde, K. J., Sorensen, C. M., & Hadjapanayis, G. C. (1992). Borohydride reductions of metal ions. A new understanding of the chemistry leading to nanoscale particles of metals, Borides, and metal borates. *Langmuir*, 8(3), 771–773. <https://doi.org/10.1021/la00039a008>
- Gómez, R., & Murillo, R. (2006). Espectroscopía infrarroja. Universidad Nacional Autónoma de Mexico.)
- Guardo-Gómez, V., Fajardo-Perdomo, M. A., Muñoz, A. L., & Gómez, L. A. (2020). Ingeniería Tisular Para Regeneración Nerviosa: Una Revisión. *Revista chilena de neuro-psiquiatría*, 58(1), 50-60.
- Gunsch, G., Paradie, E., & Townsend, K. L. (2023). Peripheral nervous system glia in support of metabolic tissue functions. *Trends In Endocrinology And Metabolism*, 34(10), 622-639. <https://doi.org/10.1016/j.tem.2023.07.004>
- Gupta, P. (2025). Sources, synthesis, and classification of nanomaterials. En Elsevier eBooks (pp. 25-55). <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-33805-2.00002-2>
- Helgason, C. D., & Miller, C. L. (Eds.). (2013). *Basic Cell Culture Protocols*. 946. <https://doi.org/10.1007/978-1-62703-128-8>
- Ho, Q. D., Lai, V. D., Nguyen, Q. A., Vu, D. N., Dang, T. K. L., & La, D. D. (2025). Green synthesis of g-C₃N₄/CeO₂ nanocomposites for enhanced photocatalytic degradation of organic dye under simulated sunlight. *Diamond And Related Materials*, 112484. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2025.112484>
- Huang, H., Yuan, Q., & Yang, X. (2004). Preparation and characterization of metal–Chitosan Nanocomposites. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 39(1–2), 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2004.08.014>

- İlğü, H., Turan, T., & Şanlı-Mohamed, G. (2011). Preparation, characterization and optimization of chitosan nanoparticles as carrier for immobilization of thermophilic recombinant esterase. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 48(9), 713–721. <https://doi.org/10.1080/10601325.2011.596050>
- Ipohorski, M., & Bozzano, P. (2013). Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *Ciencia e investigación*, 63(3), 43-53.
- Kai, D., Prabhakaran, M. P., Jin, G., & Ramakrishna, S. (2011). Polypyrrole-contained electrospun conductive nanofibrous membranes for cardiac tissue engineering. *Journal of Biomedical Materials Research. Part A*, 99(3), 376–385. <https://doi.org/10.1002/JBM.A.33200>
- Kaplan, H. M., Mishra, P., & Kohn, J. (2015). The overwhelming use of rat models in nerve regeneration research may compromise designs of nerve guidance conduits for humans. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 26(8). <https://doi.org/10.1007/s10856-015-5558-4>
- Kim, H. J., Lee, J. S., Park, J. M., Lee, S., Hong, S. J., Park, J. S., & Park, K. (2020). Fabrication of nanocomposites complexed with gold nanoparticles on polyaniline and application to their nerve regeneration. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(27), 30750-30760. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c05286>
- Koirala, P., Bhattarai, P., Sriprabhom, J., Zhang, R., Nirmal, S., & Nirmal, N. (2024). Recent progress of functional nano-chitosan in pharmaceutical and biomedical applications: An updated review. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 138324. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138324>
- Li, Z., & Yu, C. (2023). Structure types and characteristics of nanomaterials. En *Nanostructured Materials* (pp. 15-41). <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-19256-2.00004-1>
- Lin, Y., Jen, J., Hsu, S., & Chiu, I. (2008). Sciatic nerve repair by microgrooved nerve conduits made of chitosan-Gold nanocomposites. *Surgical Neurology*, 70, S9-S18. <https://doi.org/10.1016/j.surneu.2008.01.057>
- Loaiza, M., Chavez, G., & Sabino, M. (2014). Obtención y modificación química de oligosacáridos de quitosano. *Revista latinoamericana de Metalurgia y Materiales S*, 6, 25-26.
- Logakannan, K. P., Guven, I., Odegard, G., Wang, K., Zhang, C., Liang, Z., & Spear, A. (2025). A review of artificial intelligence (AI)-based applications to nanocomposites. *Composites Part A Applied Science And Manufacturing*, 109027. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.109027>
- Menconi, F., Arcarí, N., De Andrea, P., & Vilches, A. (2021). Tejidos en el cuerpo humano: El tejido nervioso como ejemplo de especialización.
- Meyer, C., Stenberg, L., González-Pérez, F., Wrobel, S., Ronchi, G., Udina, E., Suganuma, S., Geuna, S., Navarro, X., Dahlin, L. B., Grothe, C., & Haastert-Talini, K. (2016). Chitosan-film Enhanced Chitosan nerve guides for long-distance regeneration of peripheral nerves. *Biomaterials*, 76, 33-51. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.10.040>
- Mohammadi, R., Sanaei, N., Ahsan, S., Rostami, H., Abbasipour-Dalivand,

- S., & Amini, K. (2014). Repair of nerve defect with chitosan graft supplemented by uncultured characterized stromal vascular fraction in streptozotocin induced diabetic rats. *International Journal of Surgery*, 12(1), 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2013.10.018>
- Monsalve García, Y. E. (2022). Actividad peroxidasa de nanopartículas de platino dispersables en agua con uso potencial en biosensores.
 - Moran, M. (2023, September 13). La Agenda para el Desarrollo Sostenible - Desarrollo Sostenible. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
 - Muzzarelli, R. A. (2009). Chitins and chitosans for the repair of wounded skin, nerve, cartilage and bone. *Carbohydrate Polymers*, 76(2), 167-182. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.11.002>
 - Nuruzzaman, M., & Mondal, M. I. H. (2025). Nano-Chitosan coated sand: A sustainable superadsorbent for removal of heavy metals and dye particles from industrial effluents. *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management*, 101076. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2025.101076>
 - Parvinnasab, A., Shahroudi, S., Salahinejad, E., Taghvaei, A. H., Fard, S. A. S., & Sharifi, E. (2024). Antibacterial nanofibrous wound dressing mats made from blended chitosan-copper complexes and polyvinyl alcohol (PVA) using electrospinning. *Carbohydrate Polymer Technologies And Applications*, 8, 100564. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100564>
 - Qian, Y., Lin, H., Yan, Z., Shi, J., & Fan, C. (2021). Functional nanomaterials in peripheral nerve regeneration: Scaffold design, chemical principles and microenvironmental remodeling. *Materials Today*, 51, 165-187. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.09.014>
 - Raihan, M. T., Mahmud, M. H., Mazumder, B. C., Chowdhury, M. N. H., & Islam, M. T. (2025). A Review of PEO (Polyethylene Oxide) Assisted Electrospinning of Chitosan: Innovation, Production, and Application. *JOURNAL OF POLYMER MATERIALS*, 42(3), 677-711. <https://doi.org/10.32604/jpm.2025.068356>
 - Saleh, T. A. (2020). Nanomaterials: Classification, properties, and environmental toxicities. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101067. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101067>
 - Sanchez, L. D., Rodriguez, L., & López, M. (2013). Electrospinning: la era de las nanofibras.
 - Seyedebrahimi, R., Razavi, S., & Varshosaz, J. (2019). Controlled delivery of brain derived neurotrophic factor and Gold-Nanoparticles from Chitosan/TPP nanoparticles for tissue engineering applications. *Journal of Cluster Science*, 31(1), 99-108. <https://doi.org/10.1007/s10876-019-01621-9>
 - Shamsabadi, A. S., Zhang, Z., Rumi, S. S., Chabi, S., Lucia, L. A., & Abidi, N. (2025). High-pressure CO₂ treatment of cellulose, chitin and chitosan: A mini review and perspective. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 142097. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142097>

- Sierra, D. M. E., Ramírez, A. M. C., & Castrillón, N. A. V. (2014). Determinación de la relación entre el porcentaje del grupo amino y el grado de desacetilación del quitosano. *Revista de Ciencias*, 18(1), 73-88.
- Singh, N., Kaur, A., Madhu, A., & Yadav, M. (2025). Advancements in nanotechnology for biomedical and wearable applications. *Next Materials*, 8, 100658. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.100658>
- Ștefan, M., Melnig, V., Pricop, D., Neagu, A., Mihășan, M., Mititelu-Tarțău, L., & Hrițcu, L. (2013). Attenuated effects of chitosan-capped gold nanoparticles on LPS-induced toxicity in laboratory rats. *Materials Science and Engineering: C*, 33(1), 550-556. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.09.031>
- Sudha, P. N., Sangeetha, K., Vijayalakshmi, K., & Barhoum, A. (2018). Nanomaterials history, classification, unique properties, production and market. En *Elsevier eBooks* (pp. 341-384). <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-51254-1.00012-9>
- Sun, X., Wang, Y., Yu, J., Wei, Q., & Ren, X. (2023). Study on the deacetylation and mechanism of chitin in natural deep eutectic solvent. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 255, 127698. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127698>
- Suzuki, K., Tanaka, H., Ebara, M., Uto, K., Matsuoka, H., Nishimoto, S., Okada, K., Murase, T., & Yoshikawa, H. (2017). Electrospun nanofiber sheets incorporating methylcobalamin promote nerve regeneration and functional recovery in a rat sciatic nerve crush injury model. *Acta Biomaterialia*, 53, 250-259. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.02.004>
- Tantsyrev, A., Zvereva, M., Fadeeva, T., Nevezhina, A., Shurygina, I., Titova, Y., & Ivanov, A. (2025). Arabinogalactan-associated mechanochemical synthesis and antimicrobial activity of iodine-containing nanocomposites: the use of green technology for antimicrobial agents design. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 144971. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144971>
- Tonda-Turo, C., Ruini, F., Ramella, M., Boccafroschi, F., Gentile, P., Gioffredi, E., Labate, G. F. D., & Ciardelli, G. (2017). Non-covalently crosslinked chitosan nanofibrous mats prepared by electrospinning as substrates for soft tissue regeneration. *Carbohydrate Polymers*, 162, 82-92. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.01.050>
- Trumic, B. T., Gomidželovic, L. J., Marjanovic, S. R., & Krstic, V. R. (2015). Estudio de las características mecánicas y estructurales del platino y paladio a altas temperaturas. *Revista de Metalurgia*, 51(1), e038-e038.
- Velásquez, C. L. (2003). Algunos usos del quitosano en sistemas acuosos. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 4(2), 91.
- Waliaveettil, F. A., & Anila, E. (2025). Chitosan stabilized platinum nanoparticles: In vitro and in vivo screening for analgesic and anti-inflammatory applications. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 307(Pt 3), 142103. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142103>

- Wang, L., Yang, L., Xiao, L., Xu, C., Zhang, S., Liu, X., Gan, X., Ge, P., Wang, X., & Cui, K. (2025). High-performance thermal insulation achieved via coaxial electrospinning of hollow zirconia fibrous membranes. *Journal Of Alloys And Compounds*, 1039, 183075. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.183075>
- Wang, Z., Wang, J., Liu, J., Zhang, Y., Zhang, J., Yang, R., Meng, Z., Gong, X., & Sui, L. (2023). Platinum nanoparticles enhance osteogenic differentiation of human dental follicle stem cells via scavenging ROS. *Smart Materials In Medicine*, 4, 621-638. <https://doi.org/10.1016/j.smaim.2023.06.004>
- Winter, C. C., Katiyar, K. S., Hernandez, N. S., Song, Y. J., Struzyna, L. A., Harris, J. P., & Cullen, D. K. (2016). Transplantable living scaffolds comprised of micro-tissue engineered aligned astrocyte networks to facilitate central nervous system regeneration. *Acta Biomaterialia*, 38, 44-58. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2016.04.021>
- Wong, K., Naidu, M., David, P., Abdulla, M. A., Abdullah, N., Kuppusamy, U. R., & Sabaratnam, V. (2011). Peripheral nerve regeneration following crush injury to rat peroneal nerve by aqueous extract of medicinal Mushroom *Hericium erinaceus* (Bull.: Fr) pers. (Aphyllphoromycetideae). *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, 2011, 1-10. <https://doi.org/10.1093/ecam/nea062>
- Xu, C., Guan, S., Wang, S., Gong, W., Liu, T., Ma, X., & Sun, C. (2018). Biodegradable and electroconductive poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/carboxymethyl chitosan hydrogels for neural tissue engineering. *Materials Science and Engineering: C*, 84, 32-43. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.11.032>
- 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>
- Yang, R., Ji, F., & Jiao, J. (2024). Early central nervous system development and neuron regeneration. *Current Opinion In Genetics & Development*, 90, 102286. <https://doi.org/10.1016/j.gde.2024.102286>
- Yu, H., Chen, D., Lu, W., Zhang, C., Wang, H., Peng, Z., Jiang, H., & Xiao, C. (2025). Characterization of polyvinyl alcohol/chitosan nanofibers loaded with royal jelly by blending electrospinning for potential wound dressings. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 307, 141977. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141977>
- Zambrano Arévalo, A. M. (2014). Aproximación conceptual al análisis térmico y sus principales aplicaciones (Doctoral dissertation)
- Zerpa, J. A. M., Rincón, M. C., Rincón, D., & Colina, J. A. V. (2017). Efecto del uso de quitosano en el mejoramiento del cultivo del arroz (*Oryza sativa* L. variedad sd20a). *RIAA*, 8(2), 151-165.
- Zerpa, J. A. M., Rincón, M. C., Rincón, D., & Colina, J. A. V. (2017). Efecto del uso de quitosano en el mejoramiento del cultivo del arroz (*Oryza sativa* L. variedad sd20a). *RIAA*, 8(2), 151-165.

- Zhang, H., Sha, J., Cao, S., Feng, J., Pang, X., Xu, D., Hu, Y., Li, M., Zhang, C., Wang, Y., Wang, H., & Chai, R. (2025). Engineering neural recovery: Micro/nano-structured materials for nerve regeneration. *Materials Today Bio*, 35, 102538. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.102538>
- Zhang, X., Wu, S., Liu, R., Jiang, H., Jing, S., & Zhuang, H. (2025). Smart-responsive chitosan-based materials for precise degradation control and environmental remediation: A review. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 144982. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144982>
- Zhao, Y., Wang, Y., Gong, J., Liu, Y., Niu, C., Ni, X., Wang, Y., Su, P., Gu, X., Sun, C., & Yang, Y. (2017). Chitosan degradation products facilitate peripheral nerve regeneration by improving macrophage-constructed microenvironments. *Biomaterials*, 134, 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2017.02.026>
- Zheng, F., Tan, D., Zheng, Y., Chen, H., & Gao, Y. (2025). A chitosan-based deep tumor-penetrating nano-photothermal agent for enhanced chemo-photothermal combination therapy. *Materials Today Chemistry*, 45, 102676. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2025.102676>
- Zhou, Y., Zhang, Y., Nie, Y., Sun, D., Wu, D., Ban, L., Zhang, H., Yang, S., Chen, J., Du, H., & Pan, X. (2025). Recent advances and perspectives in functional chitosan-based composites for environmental remediation, energy, and biomedical applications. *Progress In Materials Science*, 101460. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101460>
- Zhu, L., Liu, T., Cai, J., Ma, J., & Chen, A. (2015). Repair and regeneration of lumbosacral nerve defects in rats with chitosan conduits containing bone marrow mesenchymal stem cells. *Injury-international Journal of The Care of The Injured*, 46(11), 2156-2163. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2015.08.035>
- Zhu, S., Meng, H., Gu, Z., & Zhao, Y. (2021). Research trend of nanoscience and nanotechnology – A bibliometric analysis of *Nano Today*. *Nano Today*, 39, 101233. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2021.101233>