

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**EVALUACIÓN ANTIMICROBIANA DE NANOTUBOS DE TITANIO Y
DE LA ALEACIÓN TI-407 POR FOTOCATÁLISIS**

POR

ING. ESTRADA LÓPEZ MARINTHIA JAQUELINE

TESIS

EN OPCIÓN DE GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIA DE LA
INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN NANOTECNOLOGÍA

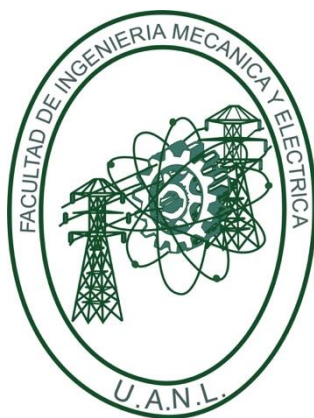
CIUDAD UNIVERSITARIA

09/12/2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**EVALUACIÓN ANTIMICROBIANA DE NANOTUBOS DE TITANIO Y
DE LA ALEACIÓN TI-407 POR FOTOCATÁLISIS**

POR

ING. ESTRADA LÓPEZ MARINTIA JAQUELINE

TESIS

EN OPCIÓN DE GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIA DE LA
INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN NANOTECNOLOGÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Evaluación antimicrobiana de nanotubos de titanio y de la aleación Ti-407 por fotocatalisis", realizada por el estudiante Marinthia Jaqueline Estrada López, con número de matrícula 2222230, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Nanotecnología.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Enrique Manuel López Cuellar
Director

Dr. Frank Eduardo Meléndez Anzures
Co-director

Dr. Rodolfo Morales Ibarra
Revisor

Dr. Marco Antonio Garza Navarro
Revisor

Dra. María Porfiria Barrón González
Revisor

Vo.Bo.

Dr. Azael Martínez de la Cruz
Secretario de Estudios de Posgrado

**SECRETARÍA DE
ESTUDIOS DE
POSGRADO**

Institución 190001
Programa 557511
Acta Núm. 4741

Ciudad Universitaria, a 24/08/2026

Contenido

Índice de figuras.	7
Índice de tablas.	9
Índice de ecuaciones.	10
CAPITULO 1.	11
INTRODUCCIÓN.....	11
1. JUSTIFICACIÓN	13
2. HIPÓTESIS.....	13
3. OBJETIVO GENERAL	14
3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	14
CAPITULO 2.	1
MARCO TEORICO	1
1. Contaminación del Medio Ambiente por Bacterias.	1
1.2 Fuentes de contaminación bacteriana en ambientes naturales y clínicos.	1
1.3 Impacto sanitario y ambiental de bacterias patógenas.	3
1.4 Necesidad de nuevos materiales antimicrobianos para descontaminación.	Error! Bookmark not defined.
2. Fotocatálisis Heterogénea.....	8
2.2 Semiconductor como fotocatalizador: mecanismos y fundamentos.	10
2.3 El dióxido de titanio (TiO ₂) como fotocatalizador.	11
2.4 Factores que influyen en la actividad fotocatalítica del TiO ₂	12
3. Titanio y sus aleaciones.	13
3.1 Aleaciones de titanio.....	15
3.2 Aleaciones α.....	16
3.3 Aleaciones β.....	17
3.4 Aleaciones α-β.	18
4. Ti-407 y sus propiedades.	18
4.1 Funcionalización Superficial del Titanio por Anodizado.	20
4.2 Principios del anodizado electroquímico.	21
4.3 Mecanismo de formación de nanotubos de TiO ₂	23
4.4 Técnicas de caracterización de las nanoestructuras.	24
5. El TiO ₂ como solución fotocatalítica para la descontaminación... Error! Bookmark not defined.	
5.1 Limitaciones de los métodos convencionales de desinfección.. Error! Bookmark not defined.	

5.2 Potencial del Ti puro y aleaciones en aplicaciones antimicrobianas.	Error! Bookmark not defined.
CAPITULO 3.	26
METODOLOGIA.....	26
1. Preparación de muestras.	28
1.1 Anodizado.	28
1.2 Caracterización.	29
2. Microscopio electrónico de barrido (SEM).	30
3. Análisis de imagen.	30
4. Espectroscopia Raman.	31
5. Espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos-x (XPS).....	32
6. Espectroscopia UV-Vis.....	33
7. Difracción de rayos X.	35
8. Método de McFarland y cuantificación bacteriana. ..	Error! Bookmark not defined.
9. Procedimiento microbiológico en titanio puro y Ti-407.....	36
10. Recuento bacteriano en placa.	38
CAPITULO 4.	39
RESULTADOS Y DISCUSION.....	39
PARTE 1. Titanio puro.....	39
1. Caracterización de morfología por SEM.	39
2. Cálculo del incremento del área expuesta.....	40
3. Espectroscopia RAMAN.	43
4. Espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos-X (XPS).....	45
5. Espectroscopia UV-Vis.....	47
6. Difracción de rayos-X.	48
7. Condiciones experimentales de fotocátalisis en bacterias.	52
7.1 Pruebas antibacterianas por fotocátalisis.	52
7.2 Resultados para E. coli.....	53
7.3 Resultados en <i>P. aeruginosa</i>	55
PARTE 2. Ti-407.....	59
1. Microscopía electrónica de barrido.	59
2. Cálculo del incremento del área expuesta.	60
3. Espectroscopia de energía dispersiva (EDS).	62
4. Espectroscopia RAMAN.	64
5. Espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos-x (XPS).....	66

6. Espectroscopia UV-Vis.....	69
7. Difracción de rayos-x.....	70
8. Condiciones experimentales de fotocátalisis en bacterias.	73
8.1 Resultados <i>E.coli</i>	74
8.2 Resultados en <i>P. aeruginosa</i>	77
PARTE 3.	81
Síntesis de resultados.....	81
1. Comparativo entre los resultados del Ti puro y la aleación Ti-407.....	81
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.	84
Referencias	85

Índice de figuras.

Figura 1. Clasificación de las áreas ambientales en función de la proximidad al paciente. (López-Cerero, Papel del ambiente hospitalario y los equipamientos en la transmisión de las infecciones nosocomiales, 2013).....	3
Figura 2. Representación esquemática del proceso fotocatalítico empleando un semiconductor. (Aniket Balapure J. R., 2023)	9
Figura 3. Esquema del cambio de energía de Gibbs en reacciones fotocatalíticas. (BORGES, y otros, 2008).....	12
Figura 4. Estructura bimodal de la aleación Ti6Al4V.....	15
Figura 5. Estructura bimodal de la aleación Ti6Al4V. (ALBERTO MAIMONE, 2014)	21
Figura 6. Procedimiento experimental general.....	26
Figura 7. 2 A) Esquema del proceso de anodizado B) fotografía del proceso.	29
Figura 8. Microscopio electrónico de barrido (SEM). (Centro de Investigación en Materiales Avanzados, s.f.)	30
Figura 9. ImagenJ programa de análisis de imagen. (ImageJ, 2024)	31
Figura 10. Espectroscopia Raman. (Guia lab, 2016).....	32
Figura 11. Espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos-x (X-ray photoelectron spectroscopy). (University of Nottingham, s.f.)	32
Figura 12. Cary series UV-Vis NIR Spectrophotometer.....	35
Figura 13. Difracción de rayos X.	36
Figura 14. Esquema del método de McFarland.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 15. Diluciones seriadas.....	37
Figura 16. Plaqueo de las diluciones seriadas para posteriormente incubar.	38
Figura 17. Análisis de superficie de Ti puro mediante SEM A)5.0kV 13.1 mm x 30.0kX B) 5.0kV 13.1 mm x 70.0kX.	39
Figura 18. (A) Imagen total de nanotubos a 500 nm de los nanotubos de la aleación Titanio puro por medio de ImageJ (B) Micrografía a 500 nm con medición de 10 nanotubos señalados.....	40
Figura 19. Esquema de la superficie modificada con 3 nanotubos.	43
Figura 20. Espectroscopia Raman 10 mW zona 1.....	44

Figura 21. Espectroscopia Raman 10 mW zona 2.....	44
Figura 22. XPS muestra de Titanio puro anodizado.....	46
Figura 23. Espectroscopia UV-Vis A) muestra 1 titanio puro anodizado B) muestra 2 titanio puro anodizado.	48
Figura 24. Difracción de rayos-X en muestra de titanio puro.	48
Figura 25. Difracción de rayos-x de nanotubos en titanio puro.	50
Figura 26. Difracción de rayos-x nanotubos con tratamiento térmico a 450 °C en titanio puro.	51
Figura 27. Representación visual de los resultados en pruebas antimicrobianas Titanio puro en E.coli.	55
Figura 28. Unidades formadoras de colonias en P. aeruginosa.	56
Figura 29. Representación visual de los resultados en pruebas antimicrobianas Titanio puro en P. aeruginosa.	58
Figura 30. Micrografía de SEM de la superficie de Ti-407 anodizado a 45V durante 30 min.	59
Figura 31. A) Imagen total de nanotubos a 1.00 µm B) medición de 10 nanotubos.	60
Figura 32. EDS de Ti-407.	63
Figura 33. Espectroscopia Raman en Ti-407 a 10 mW en zona 1.....	65
Figura 34. Espectroscopia Raman en Ti-407 a 10 mW en zona 2.....	66
Figura 35. XPS en Ti-407.....	68
Figura 36. Espectroscopia UV-VIS A) muestra 1 B) muestra 2.	69
Figura 37. Espectroscopia UV-Vis A) muestra 3 B) muestra 4.....	70
Figura 38. Espectroscopia UV-Vis en Ti-407 decapado.	71
Figura 39. Espectroscopia UV-Vis Ti-407 con nanotubos.....	72
Figura 40. Espectroscopia UV-VIS Ti-407 con tratamiento térmico.....	73
Figura 41. Unidades formadoras de colonias en Ti-407 para E. coli.	75
Figura 42. Representación visual en Ti-407 para E. coli.	77
Figura 43. Unidades formadoras de colonias en Ti-407 para P. aeruginosa.	78
Figura 44. Representación visual de Ti-407 para P. aeruginosa.	80

Índice de tablas.

Tabla 1. ImageJ total de nanotubos.	41
Tabla 2. Calculo individual del área de los nanotubos.	41
Tabla 3. Porcentaje de inhibición E. coli en Titanio puro.	54
Tabla 4. Porcentaje de inhibición en P. aeruginosa.	57
Tabla 5. Total de nanotubos en 1 μm	61
Tabla 6. Medidas de 10 nanotubos.	61
Tabla 7. Elementos medidos por medio de EDS en Ti-407.	64
Tabla 8. Porcentaje de inhibición en Ti-407 para E.coli.	76
Tabla 9. Porcentaje de inhibición en Ti-407 para P. aeruginosa	79
Tabla 10. Comparacion de los dos tipos de aleaciones.	81
Tabla 11. Porcentajes de inhibición de los óxidos (Anodizados) en bacterias sin y con UV.	82
Tabla 12. Diferencias entre el incremento del porcentaje de inhibición del estado con y sin luz UV.	83

Índice de ecuaciones.

Ecuación 1. Análisis cuantitativo.	33
Ecuación 2. Relación de Planck-Einstein.	33
Ecuación 3. Método de Tauc.	33
Ecuación 4. Incremento del área.....	42
Ecuación 5. Incremento del área Ti-407.....	62

CAPITULO 1.

INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, el titanio y sus derivados han sido ampliamente estudiados debido a sus destacadas propiedades físicas, químicas y biológicas, tales como baja densidad, alta resistencia mecánica, excelente resistencia a la corrosión y biocompatibilidad. Estas características han permitido su implementación en diversas áreas como la medicina, la biología y la industria aeroespacial. En particular, los óxidos de titanio, especialmente el dióxido de titanio (TiO_2), han generado gran interés debido a sus propiedades fotocatalíticas, semiconductoras y antimicrobianas (Aniket Balapure J. R., 2023)

En este contexto, los nanotubos de TiO_2 han surgido como una nanoestructura altamente funcional gracias a su elevada relación superficie/volumen, estabilidad química y capacidad de generar especies reactivas de oxígeno (ROS) bajo irradiación UV. Estas características los hacen especialmente atractivos para aplicaciones en descontaminación ambiental, tratamiento de aguas y control microbiológico. La formación de estos nanotubos se realiza comúnmente mediante anodización electroquímica de sustratos de titanio en soluciones que contienen fluoruros, lo que permite controlar parámetros como diámetro, longitud y grosor de pared (C. Veiga J. D., 2012).

Diversos estudios han demostrado que los nanotubos de TiO_2 presentan propiedades eléctricas, ópticas y fotocatalíticas superiores, además de una adecuada compatibilidad biológica. Gracias a ello, han sido utilizados en aplicaciones como celdas solares, fotoelectrólisis del agua, detección de gases y en el campo biomédico, particularmente en sistemas de liberación controlada de fármacos y en la mejora del comportamiento celular (Krumdieck, 2019). Desde su descubrimiento en 1999, se ha evidenciado que su morfología tubular ofrece ventajas frente a otras nanoestructuras, como nanopartículas o nanorods, debido a su orientación vertical y uniformidad, lo que incrementa la eficiencia en procesos fotoelectroquímicos (Emeline N. S., 2012).

En el ámbito antimicrobiano, la actividad del TiO_2 ha sido ampliamente documentada. Bajo irradiación UV, el material absorbe fotones con energía suficiente para generar pares electrón-hueco, los cuales reaccionan con agua y oxígeno produciendo especies reactivas como radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$), aniones superóxido (O_2^-) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Estas especies inducen daño oxidativo en membranas celulares, proteínas y ADN de los microorganismos, provocando su inactivación. Estudios han reportado reducciones de hasta el 99.9% en bacterias tras exposición a radiación UV en presencia de TiO_2 , siendo la eficiencia dependiente de factores como la fase cristalina, la morfología y la composición superficial del material (Shaik Basha, 2025).

A pesar del amplio estudio de los nanotubos de TiO_2 obtenidos a partir de titanio puro, existe una limitada investigación sobre el uso de aleaciones de titanio como sustratos para su síntesis. Las aleaciones, como la Ti-407 (tipo $\alpha + \beta$), contienen elementos como aluminio y hierro que pueden modificar las propiedades estructurales, térmicas y fotoelectroquímicas del óxido formado. Sin embargo, su influencia en la formación de nanotubos y en su actividad antimicrobiana aún no ha sido completamente esclarecida.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar la formación de nanotubos de TiO_2 a partir de titanio puro y de la aleación Ti-407, así como evaluar y comparar su actividad antimicrobiana bajo irradiación UV. Se busca analizar la influencia de los elementos aleantes en el proceso de anodización y en las propiedades funcionales del material resultante, contribuyendo al entendimiento del uso de aleaciones de titanio en aplicaciones antimicrobianas.

Este trabajo se centra en estudiar la formación de nanotubos de TiO_2 a partir del titanio puro y la aleación Ti-407, con énfasis en la comprobación y comparación de su actividad antimicrobiana inducida por irradiación UV. Mientras que gran parte de las investigaciones se han centrado en TiO_2 formado en titanio puro, **las aleaciones de titanio** también pueden ser empleadas como sustratos, especialmente si aportan ventajas mecánicas o estructurales. La **aleación Ti-407** es una aleación alfa + beta que contiene aluminio, hierro y otros

elementos que mejoran su ductilidad y maquinabilidad. Aunque ha sido estudiada principalmente en contextos aeroespaciales, su uso como precursor en la formación de nanotubos de TiO_2 es escasamente documentado.

Se espera que los **elementos aleantes** presentes en Ti-407 influyan en el proceso de anodización y en las propiedades del óxido resultante. Por ejemplo, estudios previos han mostrado que la adición de elementos como Fe, Al o Nb puede afectar la cristalinidad, estabilidad térmica y actividad fotocatalítica del TiO_2 (Joan Lario O. , 2018).

1. JUSTIFICACIÓN

La creciente resistencia bacteriana a los antibióticos ha impulsado la búsqueda de nuevas estrategias para el control microbiano. En este contexto, los materiales con propiedades fotocatalíticas, como el dióxido de titanio (TiO_2), activados por luz ultravioleta, han demostrado un alto potencial antimicrobiano.

Sin embargo, **persiste una falta de conocimiento** respecto al comportamiento de los nanotubos de TiO_2 formados a partir de aleaciones como la Ti-407. En particular, el efecto de los elementos aleantes sobre la morfología, la estabilidad y la eficiencia fotocatalítica de estos nanotubos no ha sido suficientemente estudiado. Comprender estas variables es fundamental para optimizar su funcionalidad. El estudio de estas propiedades no solo permitirá ampliar el conocimiento sobre la síntesis y aplicación de nanomateriales antimicrobianos, sino que también podrá contribuir al diseño de nuevos recubrimientos para entornos clínicos y sistemas de purificación de aire.

2. HIPÓTESIS

El uso Ti-407 y titanio puro en la formación de nanotubos de titanio por anodizado, generará diferencias microestructurales que se reflejan en una variación en la actividad antimicrobiana frente a bacterias mediante el proceso de fotocátalisis.

3. OBJETIVO GENERAL

Sintetizar, caracterizar y evaluar nanoestructuras con capacidad fotocatalítica obtenidas por anodización electroquímica de **titanio puro y la aleación Ti-407**, con el objetivo de evaluar su desempeño en la eliminación de *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Sintetizar nanoestructuras de dióxido de titanio (TiO₂) mediante anodización electroquímica en titanio puro y aleación Ti-407.
- Caracterizar morfológica, estructural y químicamente las nanoestructuras obtenidas, utilizando técnicas como microscopio electrónico de barrido por sus siglas en inglés “Scanning electron microscope” (SEM), Espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos X por su significado en inglés “X-ray photoelectron spectroscopy” (XPS), Espectroscopia Raman, “X-ray diffraction” Difracción de Rayos X (XRD), y por último un análisis de imagen por medio ImageJ.
- Evaluar la actividad fotocatalítica de las nanoestructuras bajo irradiación UV en medios acuosos contaminados con *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*.
- Comparar la eficiencia antimicrobiana de las nanoestructuras obtenidas en titanio puro frente a la aleación Ti-407.
- Analizar la relación entre las condiciones de anodización y las propiedades fotocatalíticas observadas.
- Evaluar el efecto de los elementos aleantes metálicos en las propiedades fotocatalíticas y estructurales en los óxidos obtenidos del proceso de anodizado, y cómo es que esto afecta a sus propiedades antimicrobianas.

CAPITULO 2.

MARCO TEORICO

1. Contaminación del Medio Ambiente por Bacterias.

La contaminación del medio ambiente por bacterias puede tener efectos significativos en la salud humana y los ecosistemas. Las bacterias presentes en partículas contaminantes como PM2.5 pueden transportar genes de resistencia a antibióticos, aumentando el riesgo de infecciones difíciles de tratar. Estas partículas pueden ser inhaladas, llevando bacterias resistentes al organismo, lo que representa una amenaza para la salud pública. Además, la contaminación bacteriana también puede causar reacciones inflamatorias, infecciones respiratorias, y contribuir a enfermedades cardiovasculares, asmáticas y metabólicas. (reyes, 2012).

Las interacciones entre las bacterias y los metales son conocidas y pueden ocurrir a nivel extracelular, en la superficie bacteriana e intracelularmente. Las interacciones con la superficie celular dependen del tipo de bacteria, ya que el metal interactúa con los grupos específicos cargados negativamente en cada uno de ellos. A nivel intracelular, como consecuencia de la acumulación del metal ocurren transformaciones enzimáticas y la síntesis de proteínas específicas conocidas como metalotioninas. Dado el importante papel que juegan las bacterias en los ecosistemas, la alta toxicidad, ampliamente conocida, de los metales y la relevancia de las interacciones entre esos microorganismos y los iones metálicos, el presente trabajo pretende revisar los diferentes mecanismos descritos que hacen accesibles los metales a las bacterias. (reyes, 2012)

1.2 Fuentes de contaminación bacteriana en ambientes naturales y clínicos.

Existen diferentes fuentes de contaminación en el ambiente como lo son el aire, el suelo, el agua, entre otras. En el medio aéreo la contaminación microbiológica está formada por “los microorganismos tales como son las bacterias, virus y fungi cuya difusión propicia el riesgo a cuadros infecciosos. Ciertos microorganismos crean toxinas: endotoxinas de las bacterias

y micotoxinas de los fungí. Algunos elementos infecciosos se propagan entre las mismas personas, resultando los sistemas de ventilación favorecedores para su propagación (tuberculosis, infección gripal y resfrió. (López-Cerero, Papel del ambiente hospitalario y los equipamientos en la transmisión de las infecciones nosocomiales, 2014)

Las enfermedades infecciosas que se transmiten por el aire se propagan mejor en espacios cerrados debido a que la cantidad de aire disponible para su dilución es escasa y a que las personas están expuestas durante más tiempo en esos ambientes.

Es importante señalar que "los aeroalérgenos son antígenos, o sea nombre se refiere a cualquier elemento que tiene la capacidad de generar una acción patológica al entrar en el organismo del huésped por medio de su sistema inmunológico. En los espacios cerrados, se pueden encontrar en los sistemas de calefacción, ventilación, aire acondicionado y térmicos que generan procesos de condensación. Asimismo, en superficies húmedas, porosas, permeables, vegetales y de desechos orgánicos, así como también en excremento de animales. (Castro, 2025)

En el caso de ambientes clínicos las fuentes de contaminación bacteriana incluyen diversas áreas y objetos que actúan como reservorios y vehículos de transmisión de bacterias patógenas. Entre las principales fuentes está

- Manos del personal sanitario, que actúan como medio de transporte principal de gérmenes.
- Utillaje médico e instrumentos quirúrgicos, especialmente si no se esterilizan correctamente.
- Carros y bandejas de instrumentos, equipos de diagnóstico, y superficies textiles o ropa hospitalaria.
- Teclados, teléfonos, barandillas de camas, estaciones de trabajo y mesas en áreas clínicas.
- Sistemas de agua sanitaria y duchas, que pueden estar contaminados con bacterias que se transmiten por contacto directo, ingestión o aerosoles.

- Comida hospitalaria, que en ocasiones ha sido identificada como fuente de brotes infecciosos.
- Áreas de contacto frecuente, como lavamanos y superficies como barandillas o muebles, que pueden albergar bacterias multirresistentes.
- Equipos médicos como bombas de inhalación, monitores y otros dispositivos en la unidad de cuidado intensivo.

Estas fuentes propician la contaminación cruzada y facilitan infecciones nosocomiales, por lo que es crucial una adecuada limpieza, desinfección, manejo higiénico, y capacitación del personal para prevenir la transmisión bacteriana en hospitales y clínicas. (Castro, 2025)

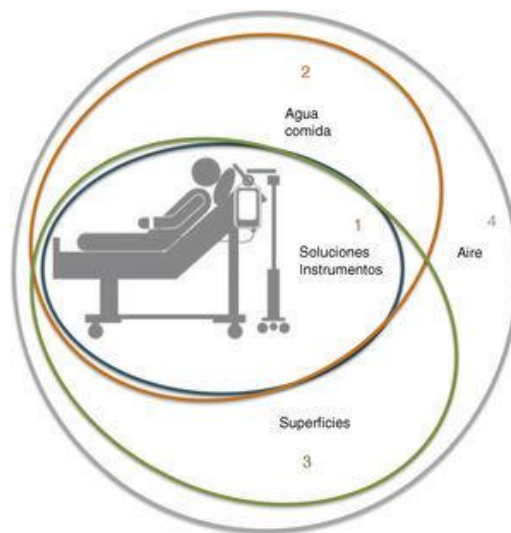


Figura 1. Clasificación de las áreas ambientales en función de la proximidad al paciente. (López-Cerero, Papel del ambiente hospitalario y los equipamientos en la transmisión de las infecciones nosocomiales, 2013)

1.3 Impacto sanitario y ambiental de bacterias patógenas.

Para los investigadores, las autoridades sanitarias y los profesionales de la salud en México, el análisis de bacterias patógenas se ha vuelto esencial. La necesidad de detectar nuevas amenazas bacterianas que suponen un serio peligro para la salud pública se hace patente a medida que crecen los casos de enfermedades infecciosas. Este tipo de análisis, que se apoya en la vigilancia epidemiológica y en tecnología avanzada de laboratorio, no solo hace posible

identificar patógenos emergentes, sino también establecer tácticas eficaces para prevenirlos y controlarlos. (Chatterjee P, 2024)

Un elemento conocido que contribuye a la propagación de infecciones relacionadas con el cuidado de la salud (IAAS) es la contaminación microbiana en los hospitales. Un nuevo estudio, publicado en la edición de enero de 2024 del American Journal of Infection Control (AJIC), demuestra que, a pesar de que se han implementado protocolos estrictos para desinfectar y proteger a los trabajadores sanitarios y pacientes, las prácticas actuales podrían no ser suficientes para evitar la difusión de patógenos en superficies con mucho contacto.

En un hospital se pueden identificar más 60 tipos diferentes de bacterias en todas las muestras, incluyendo 18 patógenos humanos conocidos y varios tipos de bacterias que pueden ser patógenas para los seres humanos bajo ciertas circunstancias. Algunos de estos microorganismos potencialmente patógenos han sido asociados con infecciones del torrente sanguíneo relacionadas con catéteres, meningitis y endocarditis. (Llanos-Cuentas, 2016)

Según datos del Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica (SINAVE), entre 2018 y 2023 se ha documentado lo siguiente. (López-Cerero, Papel del ambiente hospitalario y los equipamientos en la transmisión de las infecciones nosocomiales, 2013)

- Más de 40,000 casos anuales de infecciones intestinales por bacterias.
- Un incremento del 25% en reportes de bacterias multirresistentes en hospitales del Valle de México.
- Al menos 1 de cada 7 infecciones hospitalarias está relacionada con un patógeno resistente a múltiples antibióticos.

Además, México ocupa el tercer lugar en América Latina en uso indiscriminado de antibióticos, lo cual fortalece la resistencia bacteriana, un problema reconocido por la Organización Mundial de la Salud como una de las diez amenazas principales para la salud mundial. (Castro, 2025).

2. Limitaciones de los métodos convencionales de desinfección.

Durante décadas, las técnicas tradicionales de desinfección, que incluyen el ozono, la radiación ultravioleta (UV), el cloro y los métodos térmicos, han sido las estrategias más utilizadas para controlar los microorganismos en superficies, agua y entornos industriales. A pesar de que estos procesos tienen una eficacia comprobada, se han encontrado en años recientes varias limitaciones asociadas con la creación de subproductos tóxicos, la pérdida de efectividad frente a microorganismos resistentes y la insostenibilidad a largo plazo, lo cual ha motivado la búsqueda de opciones más eficaces y seguras.

Por su bajo costo y simple aplicación, la utilización de cloro y sus derivados sigue siendo uno de los métodos más populares. No obstante, existen limitaciones significativas en la cloración. La aparición de subproductos de desinfección (DBPs), como los ácidos haloacéticos (HAAs) y los trihalometanos (THMs), es uno de los problemas más relevantes. Estos compuestos están relacionados con efectos citotóxicos y genotóxicos en seres humanos. La generación de DBPs es más alta cuando hay materia orgánica natural y temperaturas altas, lo que hace más difícil su control en situaciones reales, según estudios recientes. Además, algunos microorganismos, incluyendo *Cryptosporidium parvum* y ciertos virus entéricos, presentan tolerancia significativa al cloro, dificultando la erradicación completa en sistemas de tratamiento convencionales. (Gerrity, 2018)

Otra opción frecuente, particularmente en plantas de tratamiento de agua, es el uso de radiación ultravioleta (UV-C). Aunque la UV-C tiene la capacidad de eliminar microorganismos al dañar directamente el ADN, su eficacia disminuye en aguas turbias o con un contenido orgánico elevado porque la luz se dispersa y absorbe. La UV, por otro lado, no brinda un efecto residual, lo cual puede dar lugar a una posible recontaminación en etapas posteriores del proceso. Recientemente se ha informado también sobre la capacitación de poblaciones microbianas que son resistentes a la radiación ultravioleta o que poseen mecanismos para reparar el ADN. (Shaik Basha, 2025)

Por último, aunque los procesos térmicos son eficaces, requieren un alto consumo de energía, lo que restringe su aplicación en tratamientos a gran escala o en áreas con acceso limitado a

la energía. Además, la exposición a temperaturas elevadas por un tiempo prolongado puede dañar los materiales, restringir el uso industrial y agrandar la huella ambiental vinculada al proceso. En resumen, estas limitaciones demuestran la necesidad de tecnologías alternativas que proporcionen una alta efectividad antimicrobiana sin producir subproductos tóxicos ni afectar significativamente al medioambiente, y que puedan hacer frente a la amenaza cada vez más creciente de microorganismos resistentes. Los materiales que contienen titanio, como Ti puro, aleaciones y TiO_2 nanotubular, han adquirido relevancia en este contexto como plataformas con potencial para aplicaciones antimicrobianas de vanguardia. (Richardson, 2018).

2.1 El TiO_2 como solución fotocatalítica para la descontaminación.

El TiO_2 se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, entre ellas la fotocatalisis en el área ambiental para autolimpieza de superficies y purificación de aire y agua. La morfología de la estructura del TiO_2 es un elemento clave para que este material opere eficazmente como fotocatalizador. Las nanoestructuras, como las nanopartículas, los nanotubos (TNTs), los nanohilos y las nanobarras, aumentan de forma considerable el área activa superficial y favorecen la separación y movilidad de cargas fotogeneradas, disminuyendo la recombinación electrón-hueco, lo que representa una de las principales limitaciones del material. En específico, los nanotubos de TiO_2 que se han generado a través del anodizado electroquímico han demostrado un desempeño muy superior en varias investigaciones por su alineación vertical, su alta relación entre área y volumen, el transporte unidimensional de electrones y la habilidad para alterar aspectos como la longitud, el diámetro y la cristalinidad. (Chatterjee P, 2024)

El TiO_2 ha mostrado habilidad para eliminar colorantes como el naranja de metilo, la rodamina B y el azul de metileno, además de microorganismos como *Staphylococcus aureus* o *Escherichia coli* y antibióticos emergentes. En la purificación del aire, se utiliza para descomponer compuestos orgánicos volátiles (COV) como el formaldehído, el tolueno o el acetaldehído, lo que favorece la mejora de la calidad del aire en interiores. Asimismo, se ha puesto en práctica en superficies antibacterianas, sistemas antifogging, recubrimientos

autolimpiantes y mecanismos para la fotodegradación de contaminantes atmosféricos a gran escala. (Dulce Diana Cabañas Vargas, 2018)

Los nanotubos de TiO_2 han encontrado aplicación como recubrimientos para implantes dentales, ortopédicos y otros dispositivos biomédicos, con la finalidad de reducir la adhesión bacteriana y el riesgo de infección. Por ejemplo, un estudio de revisión sistemática reciente concluye que las superficies con nanotubos de TiO_2 presentan hasta tres veces menor adhesión bacteriana in vivo (aunque los resultados varían dependiendo del protocolo de anodización, de la cepa bacteriana, etc.). Otro estudio reciente investigó una matriz de nanotubos de TiO_2 sobre superficie plana de Ti-Ag y encontró una marcada inhibición frente a *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli* en infección de implantes ortopédicos. Estas aplicaciones demuestran el relevante papel de nanotubos de TiO_2 en la reducción de infecciones, especialmente en entornos clínicos de alto riesgo. (Llanes & Benavides, 2011)

2.2 Potencial del Ti puro y aleaciones en aplicaciones antimicrobianas.

Las aleaciones de titanio, en particular las del sistema α o $\alpha+\beta$ como Ti-6Al-4V y Ti-Nb-Ta-Zr, tienen un potencial antimicrobiano que proviene no solo de sus propiedades mecánicas mejoradas, sino también de su capacidad para que se pueda alterar selectivamente la superficie. El uso de elementos como el cobre, la plata o el zinc en la aleación o en la superficie tratada tiene el potencial de mejorar de manera significativa la actividad antimicrobiana a través de mecanismos fotoinducidos e iónicos. No obstante, las aleaciones tienen una capacidad destacable para crear capas de TiO_2 con propiedades fotocatalíticas que ayudan a eliminar microorganismos, incluso sin dopado extra. (Wang, 2020)

Las superficies nanoestructuradas logradas a través del anodizado han resultado ser especialmente útiles para impedir la adhesión bacteriana, un elemento esencial en la creación de biopelículas que causan infecciones duraderas, sobre todo en los implantes médicos. Estudios recientes han demostrado que los nanotubos de TiO_2 con diámetros de entre 60 y 120 nanómetros disminuyen considerablemente la proliferación de bacterias Gram-positivas y Gram-negativas, como *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* y *E. coli*. Asimismo, estos recubrimientos tienen la capacidad de promover la proliferación de células

óseas, lo que los convierte en superficies dobles: osteoconductivas y antimicrobianas. (Wang, 2020). La estabilidad química del Ti es otra gran ventaja, ya que posibilita el uso antimicrobiano en entornos adversos, como sistemas de agua, catéteres, tecnologías de fotocátalisis avanzada, superficies hospitalarias y equipos biomédicos. Su resistencia a la corrosión y el hecho de que no emita compuestos tóxicos espontáneamente hacen de este material una opción segura para usos extendidos. De igual manera, su compatibilidad con métodos de modificación superficial permite la creación de dispositivos con una capacidad antimicrobiana intrínseca, sin requerir agentes químicos extra.

3. Fotocatálisis Heterogénea.

El proceso de fotocátalisis heterogénea se vale de un fotocatalizador sólido, generalmente un semiconductor como el dióxido de titanio (TiO_2), para provocar reacciones químicas de oxidación a través del uso de la energía lumínica, ya sea natural o artificial. En este procedimiento, el fotocatalizador capta energía de la luz y produce electrones y huecos que interactúan con moléculas de agua y oxígeno para crear radicales muy reactivos que tienen la capacidad de eliminar bacterias y degradar contaminantes orgánicos. La particularidad es que el catalizador está en una fase diferente a la de los reactivos, generalmente como un sólido en presencia de gases o líquidos. (Juan Carlos Durán-Álvarez, 2015)

Las nanopartículas (NP) que poseen características semiconductoras como la absorción de luz, el traspaso de carga y una estructura electrónica propicia, entre otras, son conocidas como fotocatalizadores. Las NP fotoactivas tienen el propósito de actuar como catalizadores en varias aplicaciones, incluyendo la producción de energía sostenible y la remediación del medio ambiente. Los fotocatalizadores tienen estructuras extraordinarias y una relación superficie-volumen más elevada que los materiales a granel, lo cual aumenta su efecto. Como consecuencia, el control de la forma y dimensiones de los materiales fotocatalíticos a nivel nanométrico posibilita que se generen y produzcan materiales apropiados para su utilización en aplicaciones novedosas. (Hassaan, 2023)

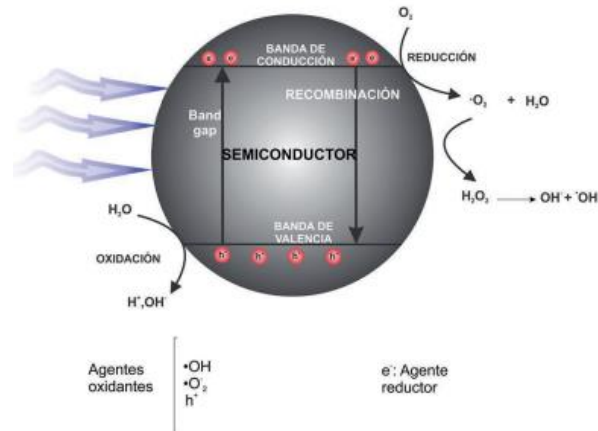


Figura 2. Representación esquemática del proceso fotocatalítico empleando un semiconductor. (Aniket Balapure J. R., 2023)

Los fotocatalizadores de tamaño nanométrico pueden ser considerados como materiales intermedios entre lo homogéneo y lo heterogéneo a causa de sus pequeñas dimensiones. Estos materiales tienen grandes áreas específicas y una cantidad significativa de sitios activos expuestos, lo que significa que hay más área de contacto con los reactantes, por lo cual son parecidos a los catalizadores homogéneos hasta cierto punto. Simultáneamente, los fotocatalizadores nanoestructurados son verdaderos catalizadores heterogéneos porque se encuentran en una fase distinta al medio de reacción (en este caso, el agua), lo que les confiere la posibilidad de ser separados y reutilizados en múltiples ciclos. (Hassaan, 2023)

3.1 Principios de la fotocatálisis heterogénea.

Los principios básicos de la fotocatálisis heterogénea se fundamentan en el uso de un fotocatalizador sólido, que suele ser un semiconductor como el dióxido de titanio (TiO_2). Este fotocatalizador produce un par electrón-hueco cuando es expuesto a luz con una energía igual o superior al ancho de banda del material. Cuando un fotón excita un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, se inicia este proceso, lo que deja una vacante positiva en la banda de valencia. Estos electrones y huecos pueden interactuar con moléculas de agua y oxígeno que están en el entorno para producir especies reactivas de oxígeno, como los radicales superóxidos (O_2^-) y los radicales hidroxilos ($\text{OH}^\cdot$), que tienen un alto poder oxidante. (BORGES, y otros, 2008)

Este proceso permite:

- La completa mineralización de contaminantes orgánicos en cortos periodos, reduciendo residuos y subproductos.
- La inactivación de microorganismos patógenos, facilitando la desinfección eficiente.
- La utilización de luz solar dinámica, especialmente si los fotocatalizadores se modifican para ser activos en el rango visible, ampliando su potencial en zonas con alta irradiación solar.

Las modificaciones en la superficie de los semiconductores, especialmente con nanopartículas metálicas, incrementan la eficiencia del proceso, permitiendo reacciones más rápidas y selectivas. Además, los nanomateriales ofrecen ventajas como mayor área superficial, mayor actividad y potencial reusabilidad del catalizador, facilitando su aplicación en sistemas de tratamiento de agua a mayor escala. (BORGES, y otros, 2008)

3.2 Semiconductor como fotocatalizador: mecanismos y fundamentos.

Cuando un semiconductor absorbe radiación electromagnética con energía igual o superior a su banda prohibida (band gap), se producen pares electrón-hueco (e^-/h^+) y, de esta manera, el semiconductor funciona como fotocatalizador. Estos portadores fotogenerados tienen la capacidad de intervenir en reacciones redox que ocurren en la superficie del semiconductor: los electrones presentes en la banda de conducción (CB) reducen especies aceptoras, como el oxígeno ($O_2 \rightarrow O_2^{\cdot-}$), mientras que los huecos contenidos en la banda de valencia (VB) oxidan donadores, como el agua u OH^- ($H_2O/OH^- \rightarrow OH^{\cdot}$). La eliminación de microorganismos y la degradación de contaminantes son provocadas por estas especies reactivas (peróxidos como el H_2O_2 , radicales hidroxilos $\bullet OH$ y superóxido $O_2^{\cdot-}$). (Aniket Balapure J. R., 2023)

Las etapas del proceso fotocatalítico se basan en lo siguiente:

- Absorción de fotones y generación de portadores donde el semiconductor absorbe fotones con $h\nu \geq E_g$, excitando electrones desde VB a CB y generando huecos en la VB.

- Separación y transporte de portadores, los pares e^-/h^+ deben separarse y migrar a la superficie del material antes de recombinarse. La eficiencia de separación y transporte es crítica para la actividad fotocatalítica.
- Reacciones superficiales en la interfase sólido-líquido o sólido-gas, los e^- reducen O_2 (o especies disueltas) y los h^+ oxidan agua o moléculas orgánicas, generando ROS.
- Mineralización / inactivación, las ROS atacan componentes celulares (membrana, proteínas, ADN) y moleculares (contaminantes orgánicos), conduciendo a su destrucción parcial o total. (Emeline N. S., 2012)

3.3 El dióxido de titanio (TiO_2) como fotocatalizador.

El TiO_2 es uno de los fotocatalizadores más estudiados por su no toxicidad, estabilidad química, bajo coste y alta actividad bajo irradiación UV. Sus principales ventajas son la estabilidad frente a corrosión/oxidación, buena disponibilidad y facilidad de síntesis en diversas morfologías (nanopartículas, nanotubos, películas) (P. Franconetti, 2013) .

El TiO_2 se puede presentar en forma de tres fases cristalinas distintas: brookita (ortorrómbica), anatasa (octaédrica) y rutilo (tetragonal) (C. Veiga J. D., 2012). Anatasa usualmente presenta más actividad fotocatalítica que el rutilo debido a su estructura electrónica diferente y a una movilidad más alta de portadores en condiciones normales; no obstante, las combinaciones anatasa-rutilo con frecuencia permiten sinergia (interfase heterogénea que favorece la separación de cargas). La cristalinidad y la relación de fases (anatasa:rutilo) son factores que determinan la actividad. (Idalia ORRANTIA, 2019). Además, el TiO_2 se puede presentar de manera amorfa o no cristalina, esta fase presenta menor actividad fotocatalítica que las cristalinas. (Krumdieck, 2019)

Bajo iluminación UV ($\lambda < \sim 387$ nm para anatasa, $E_g \approx 3.2$ eV), TiO_2 genera e^-/h^+ ; los huecos oxidan agua u OH^- formando $\bullet OH$ potentes y los electrones reducen O_2 a $O_2^{\cdot-}$ y posteriormente a H_2O_2 . Estas especies atacan la membrana celular, lípidos, proteínas y ADN, conduciendo a pérdida de viabilidad. En bacterias Gramnegativas, el efecto comienza con daño en la membrana externa y progresiva pérdida de integridad y metabolismo. Modelos

cinéticos y estudios experimentales muestran que la eficiencia depende de la dosis UV, concentración de materia orgánica y condiciones ambientales. (Susan P. Krumdieck, 2019)

3.4 Factores que influyen en la actividad fotocatalítica del TiO_2 .

En la fotocatalisis, la propiedad de un material es la actividad fotocatalítica sólida inducida mediante la irradiación de fotones con energía equivalente. La superficie a la energía de banda prohibida ("band gap") del material en su superficie, lo que genera que los electrones de la banda de valencia (BV) se exciten y se desplacen hacia la banda de conducción. Así, los electrones de valencia (BV) se excitan hacia la banda de conducción (BC), dejando vacíos en la primera.

La fotocatalisis tiene la capacidad de inducir reacciones espontáneas ($\Delta G < 0$) como reacciones no espontáneas ($\Delta G > 0$) y sus requisitos se limitan a que el potencial redox de un sustrato para ser reducido esté más anódico (por debajo) que la energía de la base de la BC y que el potencial redox de un sustrato para ser oxidado esté más catódico (por encima) que la energía del tope de la BV. Asimismo, para que una reacción redox con $\Delta G > 0$ tenga lugar, se añade a las limitaciones mencionadas anteriormente que los pasos de oxidación o reducción del sistema tienen que estar separadas a nivel químico o espacialmente. (María C. Nevárez-Martínez, 2017)

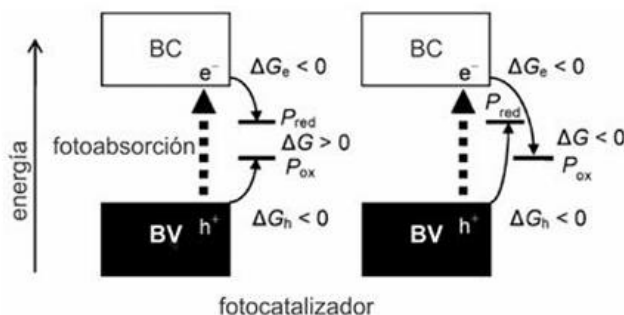


Figura 3. Esquema del cambio de energía de Gibbs en reacciones fotocatalíticas. (BORGES, y otros, 2008)

El proceso de óxido reducción fotocatalítica es afectado por distintos parámetros en términos cualitativos y cuantitativos; a continuación, se muestran los más relevantes:

- Temperatura: La velocidad de las reacciones fotocatalíticas se ve afectada de manera significativa por la variación en la temperatura.
- El pH de la solución acuosa tiene un impacto considerable en la carga de la partícula del catalizador y, por ende, en el tamaño de sus agregados y las ubicaciones de los picos y valles de las bandas del TiO₂ por su naturaleza anfótera. Es necesario trabajar a un pH distinto del punto de carga cero, en el que la superficie del óxido no tiene carga. El TiO₂ tiene un punto de carga cero (isoeléctrico) cerca del pH. Por encima o por debajo de este valor, el catalizador se carga de manera positiva o negativa.
- Intensidad de la luz. Hasta una determinada intensidad particular para cada proceso, la velocidad de reacción está directamente relacionada con la intensidad luminosa. La velocidad de reacción se vuelve proporcional a la raíz cuadrada de la intensidad luminosa, debido a un incremento en la recombinación entre electrones y huecos, a partir de esta intensidad particular. Hay muchos parámetros que afectan el proceso de degradación fotocatalítica de contaminantes, incluyendo la fuente de luz utilizada, el diseño del foto-reactor y la composición del catalizador. Estos procesos se ven influenciados por las características del catalizador. (Lorenzo, 2017)

4. Titanio y sus aleaciones.

El titanio es un material no ferroso, uno de los más livianos (4.54 g/cm³) y bastos de la corteza terrestre, con el 0.61% en el cuarto lugar después del aluminio (Al), hierro (Fe) y magnesio (Mg) con el 8.2%, el 5.2% y el 2.4%, respectivamente. La ingeniería ha recibido enormes beneficios del titanio y sus aleaciones, materiales que sobresalen por su alta resistencia, ligereza, elevada capacidad para resistir la corrosión y biocompatibilidad, lo cual los hace esenciales en industrias como variadas, como la de la aeronáutica, la automotriz y la biomédica. No obstante, el titanio tiende a deteriorarse con facilidad cuando entra en fricción con otros materiales y a pegarse a otras superficies de metal, lo que puede provocar una soldadura en frío. (German A. Rodríguez Castro, 2025)

El titanio puro presenta un comportamiento alotrópico que tiene un impacto directo en sus características mecánicas y físicas. A temperatura ambiente, su estructura cristalina corresponde a la fase alfa, que es hexagonal compacta (HCP) y se mantiene estable hasta los 882 °C. Esta fase se distingue por tener un empaquetamiento denso y una cantidad reducida de sistemas de deslizamiento, lo que da lugar a un material relativamente resistente, pero con una ductilidad limitada en temperaturas bajas. El titanio adopta la fase beta, que tiene una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), cuando la temperatura sube y supera el punto de transición alotrópica. Esta etapa, por su mayor cantidad de planos y ejes de deslizamiento, tiene una ductilidad mucho más alta y posibilita la conformación del metal a temperaturas elevadas.

Las condiciones de enfriamiento posteriores a la región beta influyen significativamente en la microestructura del titanio puro. La fase beta se convierte en láminas o granos equiaxiales de fase alfa, generando una microestructura bastante dúctil y estable, durante un enfriamiento lento, que es característico de procesos como el recocido. En cambio, si el enfriamiento es rápido, la transformación se realiza de forma martensítica. Esto produce materiales como la martensita alfa prima (α'), una fase hexagonal distorsionada que mejora la dureza y resistencia del material. No solo la rapidez del enfriamiento, sino también aspectos como la pureza química y la temperatura inicial a partir de la que se lleva a cabo el temple determinan la presencia de esta martensita.

El titanio puro tiene características que lo diferencian de otros metales estructurales. Su resistencia específica se mantiene competitiva aún sin elementos de aleación, a pesar de que su densidad es baja (4.5 g/cm³), lo cual lo hace mucho más ligero que el acero. Su módulo de elasticidad, que es aproximadamente 110 GPa, es notablemente inferior al de los aceros. Esto le confiere una flexibilidad mayor, la cual es especialmente apreciada en aplicaciones biomédicas en las que se intenta acercar el módulo al del hueso humano para facilitar la transmisión apropiada de cargas. Una de las propiedades más relevantes del titanio puro es su extraordinaria resistencia a la corrosión, la cual se debe a que en su superficie se genera de manera espontánea e instantánea una capa pasiva de dióxido de titanio (TiO₂). (Santiago Arango Santander, 2016)

4.1 Aleaciones de titanio.

Las dos estructuras cristalinas del titanio se ilustran en la Figura 4: la fase α , que es hexagonal compacta (hcp), y la fase β , que es cúbica centrada en el cuerpo (bcc). El cambio de titanio α a β ocurre a la temperatura β transus (882 ± 2 °C). Estas etapas son de gran relevancia para el rendimiento de las aleaciones de titanio, ya que impactan en la resistencia a la deformación plástica, reducción de la ductilidad, incremento de la fluencia, entre otros.

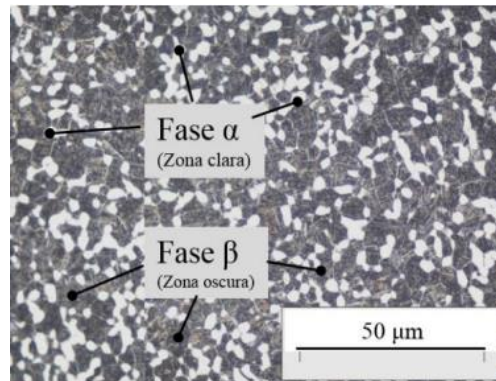


Figura 4. Estructura bimodal de la aleación Ti6Al4V.

La inclusión de átomos adicionales en la estructura cristalina de titanio ofrece una combinación de propiedades físicas, como las mecánicas, que conducen a una diversidad de aleaciones. Estas aleaciones se dividen tres son los más significativos: α , α - β , y β . (P. Franconetti, 2013)

La fase hexagonal compacta predomina en la microestructura de las aleaciones alfa, las cuales se utilizan sobre todo en aplicaciones que requieren una resistencia elevada a la corrosión y operación continua a temperaturas altas. Estas aleaciones no son tan simples de moldear en frío debido a la compacta naturaleza de su estructura cristalina y, por lo general, necesitan un procesamiento a temperaturas altas. En cambio, las aleaciones beta son mucho más dúctiles y tienen microestructuras que se basan en la fase cúbica centrada en el cuerpo. Esta ductilidad permite llevar a cabo operaciones de extrusión, laminado o conformado a temperaturas bajas.

La reacción metalúrgica de las aleaciones de titanio también se ve afectada por su comportamiento termodinámico. En la zona beta, varios componentes de aleación se disuelven más que en la fase alfa, así que el calentamiento por encima del umbral de

transición promueve la creación de soluciones sólidas. La fase beta puede cambiar de forma martensítica o difusional al enfriarse, lo cual depende de la velocidad y la composición del enfriamiento. En el proceso de enfriamiento lento desde la región beta o desde la zona alfa-beta, se generan microestructuras en placas o láminas de fase alfa dentro de un contorno beta preexistente, lo cual produce materiales que presentan alta tenacidad y resistencia a la fatiga. (J. Lario Femenía, 2016)

4.2 Aleaciones α .

Las aleaciones α de titanio son aleaciones compuestas principalmente por la fase alfa (α), que tiene una estructura hexagonal compacta estable a temperaturas normales y elevadas. Este tipo de aleaciones contiene elementos estabilizadores de la fase α , como el aluminio y el oxígeno, que mejoran la resistencia a la corrosión, la resistencia a la fluencia y la ductilidad. No son tratables térmicamente, pero tienen una excelente resistencia a la oxidación y mantienen buenas propiedades mecánicas a temperaturas elevadas (hasta 500-600 °C) (J. Lario Femenía, 2016)

Los rasgos fundamentales de las aleaciones α de titanio son los siguientes:

- Estructura monofásica que se mantiene estable a temperatura ambiental y en aplicaciones a temperaturas altas.
- Alta resistencia a la corrosión y comportamiento adecuado en entornos químicos.
- Tenacidad y ductilidad adecuadas, pero con una resistencia baja si se compara con las aleaciones β o α - β .
- No pueden ser reforzadas a través de tratamientos térmicos ordinarios.

Estas aleaciones se utilizan sobre todo en aplicaciones industriales que exigen estabilidad estructural a altas temperaturas y resistencia a la corrosión, como en el sector aeroespacial, químico y para los equipos que necesitan ser resistentes a la oxidación.

Estas aleaciones se caracterizan por tener granos equiaxiales de fase alfa en términos microestructurales. Sin embargo, también es posible que se vean microestructuras laminares en materiales que han sido procesados a temperaturas cercanas a la zona entre alfa y beta. El tamaño de grano es un elemento esencial porque afecta directamente a propiedades como la

tenacidad, la ductilidad y la resistencia a la fluencia. La resistencia mecánica se incrementa con un grano más fino, mientras que los granos de mayor tamaño proporcionan una estabilidad térmica superior. Los tratamientos térmicos en aleaciones alfa tienen un impacto más restringido que en las aleaciones alfa-beta, ya que no se cuenta con una fase beta importante que tenga el potencial de cambiarse durante el enfriamiento o calentamiento.

En contraste, las aleaciones β son más tratables térmicamente, pero tienen menos resistencia a la corrosión. Es por esto que las aleaciones α - β (por ejemplo, Ti 6Al-4V), por su parte, combinan fases α y β y también pueden ser tratadas térmicamente, logrando un balance entre ductilidad y resistencia. Las aleaciones α de titanio son perfectas para usos que demandan gran capacidad contra la corrosión y un buen desempeño a altas temperaturas sin requerir tratamiento térmico para su robustecimiento, sobresaliendo por su estabilidad y resistencia a la oxidación. (C. Veiga J. D., 2012)

4.3 Aleaciones β .

Las aleaciones de titanio de la clase β se componen de una un alto número de elementos estabilizadores de esta fase, de modo que después del temple, la estructura β permanezca intacta. Estas aleaciones se emplean para el trabajo en caliente, aunque son de calidad inferior a las usadas en las aleaciones beta más alfa. Esta etapa, además, puede endurecerse significativamente debido a la precipitación de partículas finas (P. Franconetti, 2013)

Debido a estas propiedades, se producen aleaciones de gran resistencia que tienen un uso extendido en la industria aeroespacial para los sistemas de trenes de aterrizaje. Las aleaciones beta y próximas a beta de titanio pueden llegar a tener resistencias a la tracción similares a las del acero, en contraste con las que están cercanas a alfa, optimizadas para mejorar la termofluencia.

Las aleaciones metaestables se utilizan ampliamente en aplicaciones médicas gracias a su buena biocompatibilidad y a su mayor resistencia a la corrosión gracias a la presencia de una capa estable de óxido de titanio formada con estabilizadores beta. Otras aplicaciones de estos materiales incluyen componentes aeroespaciales y sistemas de alto rendimiento para deportes de motor.

4.4 Aleaciones α - β .

Las aleaciones alfa-beta (α + β) de titanio son materiales que contienen tanto la fase alfa (α) como la fase beta (β) en su microestructura, lo que les proporciona un equilibrio entre resistencia, ductilidad y resistencia a la corrosión. Están diseñadas para ser tratables térmicamente, lo que permite mejorar significativamente sus propiedades mecánicas mediante tratamientos térmicos específicos.

Características principales de las aleaciones α + β de titanio:

- Combinan la alta resistencia de la fase beta con la ductilidad y estabilidad de la fase alfa.
- Son tratables térmicamente, permitiendo optimizar resistencia, peso y comportamiento en distintas condiciones ambientales.
- Mantienen resistencia a altas temperaturas generalmente hasta alrededor de 400 °C o superiores.
- Presentan buena resistencia a la fatiga y a la corrosión, lo que las hace ideales para aplicaciones exigentes.

El grado más utilizado de esta categoría es la aleación Ti-6Al-4V (también conocida como Grado 5), presenta una alta relación resistencia-peso y excelente resistencia a la corrosión, consolidándose como una de los más versátiles en industrias de alto rendimiento. (German A. Rodríguez Castro, 2025)

5. Ti-407 y sus propiedades.

El Ti407 se distingue de las aleaciones convencionales de titanio alfa-beta al tener una composición diferente. El Ti407 presenta una ductilidad elevada y una resistencia media debido a su menor porcentaje de aluminio. (Scott Sneddon, 2021) El Ti407, al igual que el

Ti64, es una aleación bifásica de titanio que incluye una fase beta secundaria estabilizada con vanadio y una fase alfa primaria estabilizada con aluminio.

La etapa beta se presenta como una celda cúbica centrada en el cuerpo (BCC), mientras que la fase alfa primaria se manifiesta bajo la forma de una celda unitaria hexagonal compacta anisotrópica (HCP). Usualmente, en volumen a temperatura ambiente, la fase alfa primaria es el 90-95% y prevalece sobre las características físicas y mecánicas de la aleación; por otro lado, la fase beta puede considerarse insignificante. Las propiedades anisotrópicas particulares de la fase alfa son consecuencia de la anisotropía intrínseca de su estructura cristalina HCP. (Scott Sneddon, 2021).

Según la microestructura, la aleación Ti-407 tiene un conjunto de fases α y β que se distribuyen en función del tratamiento térmico y del historial termomecánico. Se puede conseguir una microestructura bimodal o lamelar en condiciones apropiadas, lo cual tiene un impacto directo sobre sus propiedades mecánicas. Ti-407 es una aleación que presenta una buena reacción frente a procesos de conformado en caliente, ya que la fase α proporciona estabilidad estructural y la fase β , al estar controlada, permite que se produzca deformación plástica. El Ti-407 muestra una tenacidad adecuada, alta ductilidad y resistencia moderada en términos de sus propiedades mecánicas, atributos que son ideales para aplicaciones biomédicas y estructurales. Varios estudios han evidenciado que, a pesar de que su resistencia final es menor que la de Ti-6Al-4V, su habilidad para deformarse y resistir fracturas la hacen una alternativa interesante para componentes expuestos a deformaciones controladas o cargas cíclicas. Asimismo, la microestructura influye de manera significativa en su conducta frente a la fatiga, lo que posibilita mejorar su rendimiento a través de tratamientos térmicos concretos. La aleación Ti-407 tiene otra característica importante: su buena maquinabilidad en comparación con otras aleaciones de titanio, lo que simplifica su procesamiento industrial. Esto se debe, en gran medida, a que su contenido de aluminio es menor y a que el hierro actúa como estabilizador β , lo que disminuye la generación de virutas continuas y el deterioro de herramientas. Estas características incrementan su aplicabilidad en áreas que necesitan procedimientos de manufactura eficaces. (Scott Sneddona, 2021)

El comportamiento de Ti-407 durante procesos de deformación en caliente también resulta relevante desde el punto de vista metodológico. La aleación muestra una buena respuesta al conformado a altas temperaturas, con mecanismos de recristalización dinámica y recuperación que permiten refinar la microestructura. Esto facilita la obtención de superficies homogéneas y libres de defectos, condición indispensable para la posterior modificación superficial mediante técnicas electroquímicas, como el anodizado para la formación de nanotubos de TiO_2 . (Matin Bache, 2019)

5.1 Funcionalización Superficial del Titanio por Anodizado.

El anodizado es un proceso que emplea una corriente eléctrica para crear una capa de óxido en la superficie metálica. En el caso del titanio, este óxido tiene la capacidad de servir como una barrera de protección y, además, puede ser manipulado para obtener distintos colores al cambiar el voltaje aplicado. Esto sucede porque la luz interfiere con las diferentes capas del óxido, generando colores particulares en función de su espesor. (Aniket Balapure J. R., 2023). Este procedimiento se lleva a cabo al conectar el titanio como ánodo en una disolución electrolítica, que suele ser ácida (por ejemplo, ácido fosfórico o sulfúrico), y al implementar una corriente eléctrica controlada que provoca la aparición y expansión de una capa de óxido de TiO_2 en la superficie.

El proceso incluye diversos pasos: limpiar y acondicionar la superficie al principio, eliminando contaminantes, suciedad o grasas que pueden comprometer la adherencia; después, introducir el titanio en el baño electrolítico y utilizar un voltaje regulable para controlar el grosor y color de la capa de óxido creada. El anodizado tiene la posibilidad de incorporar un paso anterior de grabado para generar una superficie con microrugosidad y optimizar así la adherencia del óxido. Por último, se enjuaga el material anodizado para quitarle los residuos y se puede sellar con el fin de que la cobertura dure más. (D. Rodríguez, 2010). Esta característica es beneficiosa para usos biomédicos, aeroespaciales y en aplicaciones industriales o joyería donde se necesita funcionalización superficial con propiedades particulares.

5.2 Principios del anodizado electroquímico.

En la celda, el titanio se conecta al polo positivo (ánodo) y un cátodo (acero inoxidable o aluminio) al negativo; al aplicar corriente continua en un electrolito ácido (sulfúrico, fosfórico), ocurre electrólisis del agua, liberando oxígeno que oxida el ánodo formando TiO_2 : $\text{Ti} \rightarrow \text{Ti}^{4+} + 4\text{e}^-$, seguido de $\text{Ti}^{4+} + 2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{TiO}_2$. El voltaje controla el grosor de la capa de óxido (10-200 nm), generando interferencia óptica para colores; la migración iónica (O^{2-} hacia el ánodo, cationes al cátodo) y pasivación estabilizan la película protectora. (ALBERTO MAIMONE, 2014)

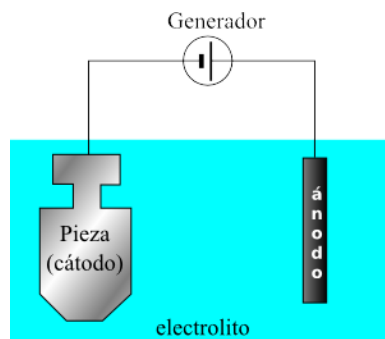


Figura 5. Estructura bimodal de la aleación Ti6Al4V . (ALBERTO MAIMONE, 2014)

El proceso de anodizado se resume en lo siguiente:

- Preparación de la superficie. Antes de anodizar, el titanio debe limpiarse para eliminar cualquier residuo, grasa o contaminante. Esto suele realizarse mediante desengrase químico y un tratamiento con ácido para preparar la superficie.
- Montaje y conexión eléctrica. La pieza de titanio se conecta al polo positivo (ánodo) de un sistema eléctrico, mientras que un cátodo, generalmente de acero inoxidable, completa el circuito en la solución electrolítica.
- Inmersión en el electrolito. La pieza se sumerge en un baño de electrolito, que puede ser una solución de ácido sulfúrico o fosfórico.
- Aplicación de corriente. Se aplica un voltaje específico, lo que genera la formación de una capa de óxido en la superficie del titanio. La variación del voltaje determina el grosor del óxido y, por tanto, el color que se produce.

- Enjuague y acabado. Una vez alcanzado el color deseado, la pieza se enjuaga cuidadosamente para eliminar los restos del electrolito. (ALBERTO MAIMONE, 2014)

El proceso comienza al conectar el metal con el polo positivo de una fuente de corriente, convirtiéndose así en el ánodo de la celda; a la vez, un conductor inerte —por lo regular, acero inoxidable, grafito o platino— funciona como cátodo. Cuando se aplica un potencial eléctrico, la superficie metálica se disuelve parcialmente y, al mismo tiempo, se genera una capa de óxido. Este último resultado es consecuencia de la reacción entre el metal y los aniones oxidados que están en el electrolito, como el ion OH^- o el ion O^{2-} . En el ánodo, el metal emite electrones y se convierte en iones metálicos que posteriormente interactúan con especies oxigenadas para generar el óxido correspondiente. (D. Rodríguez, 2010)

La estructura y el grosor del óxido anodizado están determinados por la competencia entre dos procesos que ocurren al mismo tiempo: la creación de óxido en la interfaz entre el metal y el óxido, y su disolución química en la interfaz entre el electrolito y el óxido. Cuando la formación de óxido es mayor que la disolución, se genera una película densa y compacta, característica del anodizado de aluminio o titanio en electrolitos neutros o sin sustancias agresivas. No obstante, cuando la disolución es importante, en particular bajo la presencia de fluoruro u otros aniones que reaccionan, el óxido se quiebra de manera ordenada y da lugar a nanoestructuras como nanotubos o nanopozos.

El movimiento de iones por el óxido en crecimiento depende principalmente del campo eléctrico. La aplicación de una diferencia de potencial elevada hace que los cationes metálicos se desplacen desde el metal hacia afuera y los aniones oxigenados, desde el electrolito hacia adentro. Esto ayuda a que el óxido siga formándose sin interrupción, incluso cuando el grosor se incrementa. La migración de iones se produce por medio de fallas y vacancias en la película, y su eficacia puede fluctuar dependiendo del metal que sea y las condiciones electroquímicas. Cuando se ha formado la primera capa de óxido, ocurre un proceso de auto-organización a causa del estrés mecánico y eléctrico acumulado en la película, que busca repartir los puntos de disolución de manera uniforme. (Joan Lario O. C., 2018)

Desde un punto de vista electroquímico, el proceso puede ser caracterizado por modelos que tienen en cuenta la velocidad de migración iónica, la distribución del campo eléctrico a través de la capa de óxido y el vínculo entre la tasa de disolución química y el campo eléctrico interno. Estos principios han sido esenciales para el desarrollo de procedimientos que generan estructuras con dimensiones nanométricas muy reproducibles, y permiten prever cómo se comportará el óxido, según los parámetros que se apliquen.

5.3 Mecanismo de formación de nanotubos de TiO₂.

Existen diferentes mecanismos de síntesis de nanotubos, este trabajo se centrará en que el mecanismo de formación de nanotubos de TiO₂ sobre titanio puro ocurre principalmente mediante anodización electroquímica en electrolitos ácidos (como HF o NH₄F), involucrando un equilibrio dinámico entre oxidación del metal y disolución química del óxido formado.

Estas son las etapas del mecanismo, pero también depende de la aleación y el resultado que se busca conseguir en la formación de nanotubos.

- Campo alto inicial: Formación de una capa compacta de óxido ($\text{Ti} \rightarrow \text{Ti}^{4+} + 4\text{e}^-$; $\text{Ti}^{4+} + 2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{TiO}_2$) bajo alto campo eléctrico ($\sim 10^8$ V/m), con migración iónica de O^{2-} hacia el ánodo.
- Localización de picaduras: Incremento localizado de corriente genera grietas o poros iniciales por disolución química ($\text{TiO}_2 + 6\text{HF} \rightarrow [\text{TiF}_6]^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$), iniciando auto-organización.
- Crecimiento de poros: Equilibrio entre disolución en la base del poro (por F^-) y oxidación en las paredes, alargando la estructura en nanotubos ordenados (diámetro 20-100 nm, longitud hasta μm).
- Estado estacionario: Velocidades de formación y disolución iguales mantienen la morfología tubular; post-anodizado, recocido cristaliza a anatasa (~ 450 - 550°C). (Reynaud Morales A.G, 2013)

El primer paso es la oxidación anódica del titanio, en la cual el metal se ioniza al aplicarse un potencial externo. El titanio metálico libera electrones y forma iones Ti^{4+} , los cuales reaccionan con el agua presente en el electrolito para generar una capa inicial de óxido amorfo. Este proceso puede describirse de manera simplificada mediante las reacciones: $\text{Ti} \rightarrow \text{Ti}^{4+} + 4\text{e}^-$ y $\text{Ti}^{4+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{TiO}_2 + 4\text{H}^+$. Esta capa compacta, inicialmente uniforme y continua, constituye la base sobre la cual se desarrollará la nanotubularidad.

De forma simultánea ocurre el segundo proceso esencial: la disolución química del óxido inducida por iones fluoruro (F^-). Estos iones, típicamente incorporados mediante fluoruro de amonio (NH_4F) o ácido fluorhídrico (HF), forman complejos solubles con Ti^{4+} y rompen de manera localizada la capa de óxido. El fluoruro reacciona con el TiO_2 mediante mecanismos del tipo: $\text{TiO}_2 + 6\text{F}^- + 4\text{H}^+ \rightarrow [\text{TiF}_6]^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$. La competencia entre el crecimiento electroquímico del óxido y su disolución selectiva es la condición indispensable para que la estructura evolucione desde una película compacta hasta un sistema auto ordenado de nanotubos. (Emeline N. S., 2012)

5.4 Técnicas de caracterización de las nanoestructuras.

Se utilizan métodos de caracterización de nanomateriales para observar desde varios enfoques de medición. Como ejemplo, la microscopía, que posibilita la observación directa de los objetos nanométricos; y la espectroscopía, que utiliza la absorción de diversas clases de radiación y los métodos de dispersión, fundamentados en la dispersión de irradiación. Las técnicas de caracterización son importantes porque en la exactitud con la que se establece la posición de los átomos, la manera en que están distribuidos o el tamaño del objeto nanométrico.

El análisis de los nanomateriales posibilita la medición y comprender una amplia gama de propiedades electrónicas, fisicoquímicas, ópticas, de cohesión y magnéticas, por ejemplo; para el proceso de caracterización es necesario conseguir información minuciosa e identificar con precisión qué tipo de arreglo espacial tienen los átomos y qué tipo de átomos ocupan los

espacios determinados de la red, lo cual posibilita detectar defectos, homogeneidades, impurezas e imperfecciones, entre otros elementos. (Orts, 2015)

Las técnicas más utilizadas son:

- Microscopía Electrónica de Barrido (MEB): proporciona imágenes de alta resolución de la morfología y tamaño de los nanotubos, permitiendo observar su estructura tubular y su distribución.
- Difracción de Rayos X (DRX): determina la estructura cristalina de las nanoestructuras, identificando fases como anatasa, rutilo o brookita y evaluando la cristalinidad del material.
- Espectroscopía por Energía Dispersiva de Rayos X (EDS): se emplea acoplada a la MEB para análisis elemental y composición química de las nanoestructuras.
- Espectroscopía de Reflectancia Difusa (DRS): evalúa propiedades ópticas, como la banda prohibida la capacidad de absorción de luz, esenciales en aplicaciones fotocatalíticas.
- Técnicas electroquímicas (voltamperometría cíclica, lineal y cronoamperometría): analizan la respuesta electroquímica y propiedades conductivas de las nanoestructuras.

Estas técnicas permiten una caracterización completa en términos estructurales, morfológicos, químicos y funcionales para optimizar y garantizar las propiedades deseadas en las nanoestructuras de TiO_2 . (María de las Mercedes Cely Bautista, 2025)

CAPITULO 3.

METODOLOGIA.

El desarrollo de esta investigación requirió la implementación de técnicas fisicoquímicas y microbiológicas que permitieron evaluar las propiedades de las muestras y su interacción con microorganismos de interés. Para ello, se diseñó una metodología estructurada en diferentes etapas (Figura 3.1) que incluyen la preparación y tratamiento de las aleaciones, su caracterización mediante técnicas avanzadas de análisis, así como la evaluación microbiológica frente a *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*. La combinación de estos procedimientos permitió estandarizar las condiciones experimentales, garantizar la reproducibilidad de los resultados y obtener información confiable acerca del comportamiento de los materiales frente al crecimiento bacteriano.

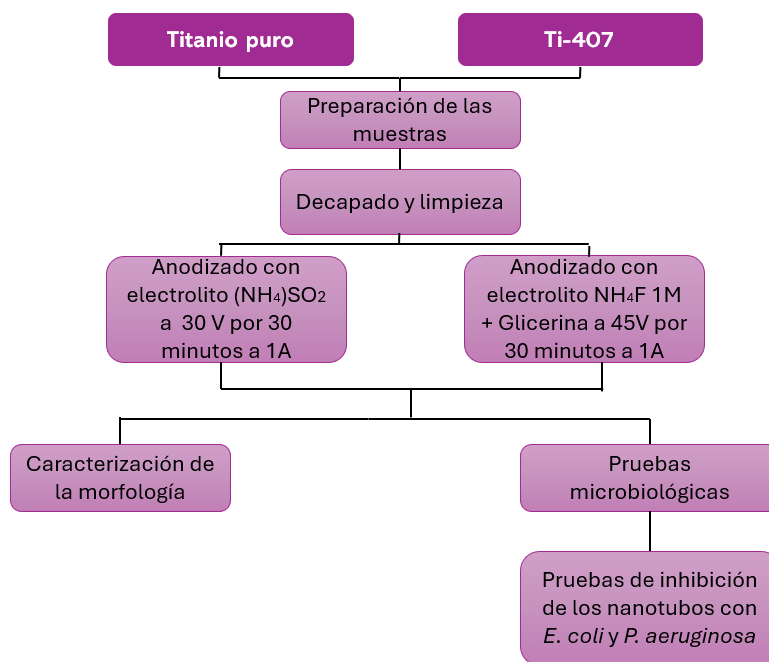


Figura 6. Procedimiento experimental general.

El esquema experimental presentado describe de manera sistemática el proceso de preparación, modificación superficial y evaluación de muestras de titanio puro y de la aleación Ti-407, con el objetivo de obtener superficies nanotubulares de dióxido de titanio (TiO_2) y analizar su comportamiento morfológico y microbiológico. El procedimiento inicia

con la selección de los materiales metálicos, diferenciando dos tipos de sustratos: titanio puro y la aleación Ti-407. Ambos materiales fueron sometidos a una etapa inicial de preparación de las muestras, la cual incluyó el acondicionamiento físico de las superficies para garantizar condiciones reproducibles durante el tratamiento electroquímico posterior.

Posteriormente, las muestras pasaron por un proceso de decapado y limpieza, cuyo propósito fue eliminar contaminantes superficiales, capas de óxidos naturales e impurezas residuales provenientes de la manufactura o manipulación. Esta etapa es fundamental para asegurar una correcta interacción entre el sustrato metálico y el electrolito durante el anodizado, favoreciendo la formación homogénea de las nanoestructuras. Una vez preparadas, las muestras fueron sometidas al proceso de anodizado electroquímico, empleando condiciones específicas según el tipo de material. En el caso del titanio puro, el anodizado se llevó a cabo utilizando un electrolito basado en $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, aplicando un voltaje de 30 V durante 30 minutos, manteniendo una corriente de 1 A. Estas condiciones permitieron la formación controlada de una capa de óxido nanotubular sobre la superficie del metal.

Por otro lado, las muestras de Ti-407 fueron anodizadas en un electrolito compuesto por NH_4F 1 M con glicerina, bajo un voltaje de 45 V durante 30 minutos, también a una corriente de 1 A. Tras el proceso de anodizado, las muestras obtenidas fueron sometidas a dos líneas principales de análisis. La primera consistió en la caracterización de la morfología, con el fin de evaluar la formación, distribución y características estructurales de los nanotubos de TiO_2 generados sobre ambas superficies. Este análisis permite correlacionar las condiciones de anodizado con la arquitectura final de las nanoestructuras.

La segunda línea de estudio correspondió a las pruebas microbiológicas, orientadas a evaluar el potencial antimicrobiano de las superficies nanotubulares. En particular, se realizaron pruebas de inhibición bacteriana empleando cepas de *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*, microorganismos representativos de bacterias Gram negativas comúnmente asociadas a infecciones hospitalarias. Estas pruebas permitieron analizar la interacción entre las bacterias y las superficies modificadas, así como la eficacia de los nanotubos de TiO_2 en la inhibición del crecimiento bacteriano. En conjunto, este procedimiento experimental permitió estudiar de manera integral la influencia del tipo de sustrato y de las condiciones de

anodizado en la formación de nanotubos de TiO_2 , así como su impacto en las propiedades morfológicas y microbiológicas de las superficies de titanio.

1. Preparación de muestras.

Las aleaciones de Titanio puro y Ti-407 fueron cortadas en piezas de 1 cm^2 . Se realizó un desbaste de las piezas con papel de carburo de silicio (SiC) hasta una lija #2400. Las placas se limpiaron por sonicación en alcohol etílico, acetona y agua destilada, para posteriormente secarlas. Este paso es fundamental para asegurar una formación homogénea de la capa nanotubular.

1.1 Anodizado.

La síntesis de nanotubos de dióxido de titanio (TiO_2) sobre la superficie de titanio puro se realizó mediante la técnica electroquímica de anodizado controlado, la cual permite la obtención de estructuras nanotubulares altamente ordenadas y adheridas al sustrato metálico.

Para llevar a cabo el proceso de anodizado, se utilizó una celda electroquímica que consta de dos electrodos. El titanio puro y la aleación Ti-407 fueron empleadas como ánodos, donde se formó la capa de nanotubos. En la figura 7 inciso A) se adjunta un esquema del proceso de anodizado mientras que en el inciso B) una fotografía del montaje del experimento respectivamente. Como cátodo, se utilizó una celda de platino. Ambos electrodos se conectaron a un circuito eléctrico externo mediante el uso de una fuente de alimentación para establecer una diferencia de potencial entre ellos las muestras de titanio puro a 30V mientras que las muestras de Ti-407 a 45V, con una intensidad de corriente de 1 A, manteniendo una distancia entre electrodos. Cada muestra fue anodizada en un volumen de 100 mL, con un tiempo de exposición a 30 minutos a temperatura ambiente en electrolitos que contenían iones fluoruros:

- Titanio puro: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1M + NH_4F 0.25 M
- Ti-407: glicerol + 0.1 M NH_4F + agua

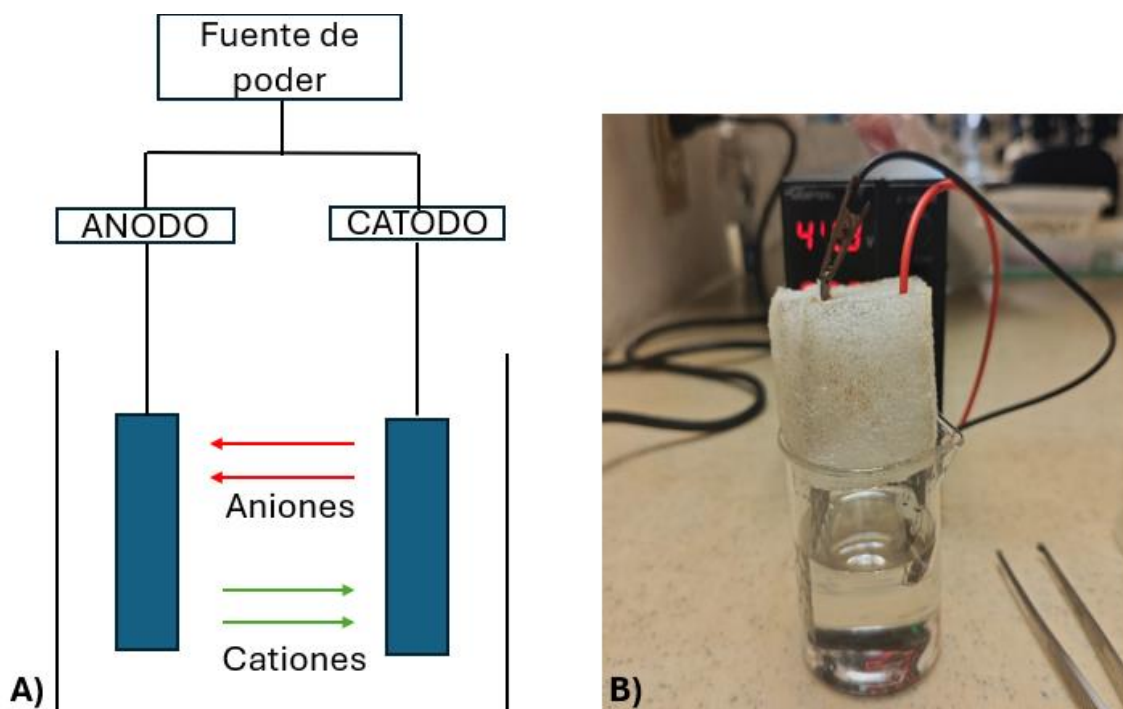


Figura 7. 2 A) Esquema del proceso de anodizado B) fotografía del proceso.

2. Caracterización de los nanotubos.

La caracterización morfológica y elemental de las muestras se llevó a cabo empleando diversas técnicas avanzadas de caracterización. El análisis cuantitativo y cualitativo de los elementos presentes en las muestras de Ti-407 y titanio puro se realizó mediante un espectrómetro de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS). Por otra parte, la evaluación de la formación nanotubos se realizó por medio del microscopio electrónico de barrido por sus siglas en inglés scanning electron microscopy (SEM), posteriormente haciendo un análisis de imagen por medio del software ImagenJ. Además, se utilizó la espectroscopia RAMAN para el análisis cristalográfico de los nanotubos. Para confirmar su fase cristalina se empleó la difracción de rayos-x. Por último, espectroscopia Uv-Vis para poder conocer su fase cristalina.

3. Microscopio electrónico de barrido (SEM).

Las muestras correspondientes a titanio puro y a la aleación Ti-407 fueron caracterizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) con el objetivo de evaluar detalladamente la morfología superficial y la estructura de los nanotubos de dióxido de titanio formados durante el proceso de síntesis. Esta técnica se basa en la interacción de un haz de electrones altamente enfocado con la superficie de la muestra, lo que da lugar a la emisión de electrones secundarios y retrodispersados, permitiendo la obtención de imágenes de alta resolución y gran profundidad de campo.

El uso de SEM permitió analizar con precisión la topografía superficial de las muestras, identificando la presencia, distribución y orientación de los nanotubos formados sobre cada sustrato. Asimismo, se examinó la uniformidad y continuidad de la capa nanotubular, considerando posibles defectos estructurales, colapsos o variaciones morfológicas asociadas al tipo de sustrato (titanio puro o Ti-407).

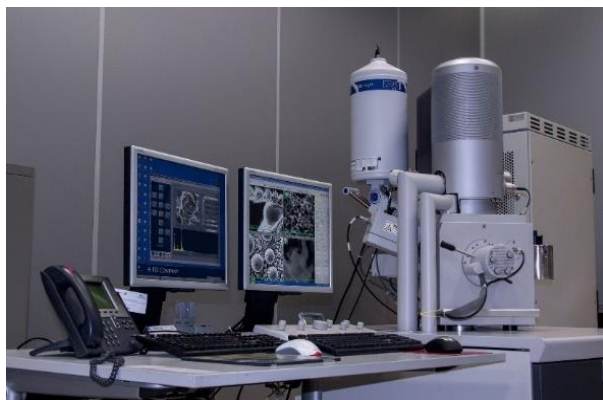


Figura 8. Microscopio electrónico de barrido (SEM). (Centro de Investigación en Materiales Avanzados, s.f.)

4. Análisis de imagen.

Con el fin de obtener datos cuantitativos a partir de las micrografías obtenidas por SEM, se realizó un análisis digital utilizando el software ImageJ (ver figura 9). Esta herramienta posibilitó medir con precisión el diámetro interno y externo de los nanotubos, calcular su distribución estadística y determinar la densidad superficial de estructuras por unidad de área. Asimismo, se elaboraron histogramas que reflejan la dispersión en el tamaño de los

nanotubos, lo que permitió evaluar la homogeneidad del recubrimiento. De esta manera, el análisis de imagen no solo complementó las observaciones cualitativas realizadas mediante SEM, sino que también proporcionó una base estadística sólida para correlacionar la morfología nanotubular con el desempeño antimicrobiano de las superficies.



Figura 9. ImageJ programa de análisis de imagen. (ImageJ, 2024)

5. Espectroscopia Raman.

La espectroscopía Raman se empleó para identificar las fases cristalinas presentes en las capas de titanio puro y Ti-407 formadas tras el anodizado. Esta técnica se basa en la dispersión inelástica de la luz láser, lo que permite obtener información vibracional de los enlaces.

En el contexto de este trabajo, el análisis Raman permitió:

- Confirmar la fase cristalina de las muestras, las cuales poseen distintas propiedades fotocatalíticas.
- Verificar el efecto del anodizado y posterior radiación UV en la transformación estructural del óxido.
- Correlacionar la presencia de la fase anatasa (altamente fotoactiva) con una mayor actividad antimicrobiana bajo radiación UV.



Figura 10. Espectroscopia Raman. (Guia lab, 2016)

6. Espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos-x (XPS).

La técnica de XPS se utilizó para determinar la composición elemental y los estados químicos presentes en la superficie de las muestras de titanio puro y Ti-407 anodizadas. Al irradiar el material con rayos X, se produce la emisión de fotoelectrones cuya energía cinética permite identificar los elementos y sus estados de oxidación. Con este análisis se confirmó la presencia de titanio y oxígeno como elementos principales, diferenciando entre Ti^{3+} y Ti^{4+} , lo que resulta crucial para valorar la calidad de la capa de óxido formada. Adicionalmente, el XPS permitió detectar la presencia de contaminantes superficiales, como carbono o restos de fluoruro provenientes del electrolito de anodizado, así como estimar de manera indirecta el espesor de la capa de óxido. Estos resultados fueron esenciales para comprender la relación entre la química superficial y la estabilidad de los nanotubos, así como su desempeño en aplicaciones antimicrobianas.



Figura 11. Espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos-x (X-ray photoelectron spectroscopy). (University of Nottingham, s.f.)

7. Espectroscopia UV-Vis.

La espectroscopía UV-Vis se utilizará para evaluar las propiedades ópticas y la capacidad fotocatalítica de los nanotubos de dióxido de titanio (TiO₂) obtenidos por anodización electroquímica. Esta técnica permite determinar la absorción de radiación ultravioleta y visible por parte del material, información fundamental para comprender su comportamiento frente a la irradiación UV empleada en los ensayos antimicrobianos.

A través del espectro de absorbancia se puede identificar la transición electrónica característica del TiO₂ y estimar su energía de banda prohibida (E_g) mediante el método de Tauc, lo que permite correlacionar la estructura electrónica con la eficiencia fotocatalítica.

Para el análisis cuantitativo de los datos obtenidos por espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis), los espectros de absorbancia registrados en función de la longitud de onda (λ) fueron procesados para calcular el coeficiente de absorción óptica (α). Este parámetro se obtiene a partir de la absorbancia (A) medida experimentalmente y se relaciona con la absorbancia mediante:

$$\alpha = \frac{2.303 A}{d}$$

Ecuación 1. Análisis cuantitativo.

donde d es el espesor efectivo de la muestra. A partir de λ (longitud de onda), la energía del fotón ($h\nu$) se determina por la ecuación:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Ecuación 2. Relación de Planck-Einstein.

donde h es la constante de Planck y c la velocidad de la luz.

La determinación de la energía de banda prohibida (E_g) se realizó utilizando el método de Tauc, el cual relaciona el coeficiente de absorción con la energía de los fotones según la expresión:

$$(\alpha h\nu)^2 = B (h\nu - E_g)$$

Ecuación 3. Método de Tauc.

donde B es una constante proporcional, n es un exponente que depende del tipo de transición electrónica (para TiO_2 con transición indirecta se utiliza $n = 1/2$) y E_g representa la energía de banda prohibida del semiconductor. La representación gráfica de $(\alpha h\nu)^{1/2}$ frente a $h\nu$ genera un tramo lineal, cuya extrapolación de la pendiente hasta cortar el eje de energía fotónica permite determinar E_g experimentalmente (método de Tauc). Este procedimiento ha sido ampliamente reportado en materiales semiconductores como TiO_2 , donde se han obtenido valores de energía de banda prohibida alrededor de 3,0–3,4 eV según las condiciones de síntesis y morfología de los nanotubos o nanopartículas. (C. Veiga J. D., 2012)

En este estudio, la gráfica de Tauc fue construida a partir de los datos de absorbancia obtenidos en el espectrofotómetro UV-Vis, transformados a coeficiente de absorción, y luego graficados como $(\alpha h\nu)^{1/2}$ vs. $H\nu$. La intersección de la prolongación de la parte lineal de la curva con el eje de energía ($h\nu$) se interpretó como el valor de E_g de los nanotubos de TiO_2 formados sobre los sustratos de titanio puro y Ti-407. Este análisis permite correlacionar las propiedades electrónicas del material con su capacidad fotocatalítica bajo irradiación ultra

Una menor energía de banda implica una mayor capacidad del material para generar pares electrón-hueco bajo irradiación, promoviendo la formación de especies reactivas de oxígeno responsables de la degradación de contaminantes y la inactivación bacteriana. (Llanes & Benavides, 2011)

Además, la comparación de los espectros obtenidos entre el Titanio puro y la aleación Ti-407 anodizados permitirá identificar variaciones en la absorción óptica atribuibles a la presencia de elementos aleantes y al tipo de nanoestructura formada. Por tanto, la espectroscopía UV-Vis constituye una herramienta esencial para establecer la relación entre las propiedades ópticas, estructurales y la actividad fotocatalítica y antimicrobiana de las superficies estudiadas.



Figura 12. Cary series UV-Vis NIR Spectrophotometer.

8. Difracción de rayos X.

La identificación de fases y el análisis de cristalinidad del material se realizaron mediante difracción de rayos X empleando radiación $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). Los patrones fueron registrados en un intervalo de 2θ de 20° a 80° , con paso angular constante y tiempos de adquisición suficientes para garantizar una buena relación señal-ruido. Dado que los nanotubos se encuentran sobre un sustrato metálico, se utilizó difracción en incidencia rasante (GIXRD) con ángulos de incidencia bajos que permiten aumentar la sensibilidad hacia la capa anodizada y minimizar la contribución del titanio subyacente. Los datos obtenidos fueron corregidos por fondo y se realizó análisis de picos para determinar posiciones, intensidades y anchuras a media altura (FWHM).

El tamaño coherente de cristalito se estimó mediante la ecuación de Scherrer aplicando la corrección instrumental correspondiente y tomando como referencia los planos característicos de las fases anatasa y rutilo. Los resultados de XRD permitieron confirmar las fases presentes en las muestras anodizadas.



Figura 13. Difracción de rayos X.

9. Procedimiento microbiológico en titanio puro y Ti-407.

Posterior al proceso de anodizado, las placas de Ti-407 y titanio puro fueron sometidas a un proceso de esterilización con el fin de garantizar la ausencia de contaminación antes de su empleo en los ensayos microbiológicos. Una vez esterilizadas, las muestras se separaron y colocaron en cajas Petri de vidrio, clasificadas de acuerdo con su tratamiento. Se prepararon dos grupos principales:

- **Tratamiento con radiación UV (365 nm):** Se colocaron tres placas anodizadas y tres placas sin anodizar dentro de una cámara de irradiación UV, a una longitud de onda de 365 nm, durante 4 horas.
- **Control sin radiación UV:** Se colocaron tres placas anodizadas y tres placas sin anodizar fuera de la cámara, manteniéndolas cubiertas de la luz natural durante el mismo periodo de 4 horas.

A cada una de las placas se le adicionaron 100 μ L de suspensión bacteriana de *Pseudomonas aeruginosa* y *Escherichia coli*. Transcurrido el tiempo de exposición, se recuperó la gota

depositada junto con la placa en un tubo cónico en cada muestra para su posterior procesamiento.

Para la cuantificación bacteriana, se realizaron diluciones seriadas hasta una concentración de 1×10^{-6} . El procedimiento consistió en transferir los 100 μL recuperados a un tubo que contenía 9.9 mL de solución salina estéril, homogenizando adecuadamente. Posteriormente, se tomaron 100 μL de esta dilución y se transfirieron a otro tubo con 9 mL de solución salina, repitiendo el proceso de forma sucesiva hasta alcanzar la dilución 1×10^{-6} .

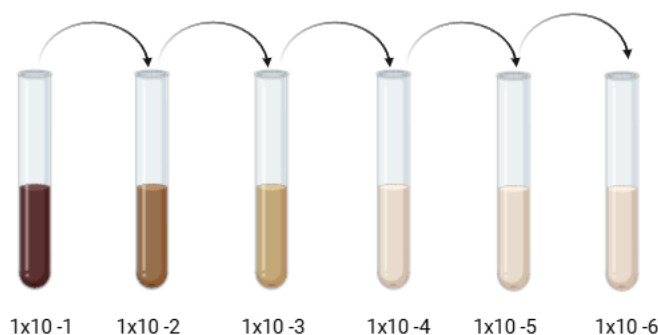


Figura 14. Diluciones seriadas.

9.1 Método de Mc Farland y cuantificación bacteriana.

Para la preparación del inóculo se utilizó el método de McFarland, con el objetivo de estandarizar la concentración bacteriana de *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*. En primer lugar, se midió en el espectrofotómetro la absorbancia correspondiente a la solución patrón de McFarland al 0.5. Posteriormente, se preparó un tubo con solución salina estéril y se inoculó con una colonia aislada de *E. coli* o *P. aeruginosa*, previamente cultivada en agar nutritivo. La suspensión bacteriana se homogenizó y se ajustó por comparación con el valor de referencia del estándar de McFarland, hasta obtener una turbidez equivalente. Una vez igualados los valores, se realizaron diluciones seriadas desde 1×10^{-11} hasta 1×10^{-6} .

De cada dilución se sembraron 1000 μL en cajas Petri con agar nutritivo, distribuyendo homogéneamente la suspensión. Posteriormente, las placas se incubaron a 37°C durante 16 horas. Transcurrido este tiempo, se procedió al conteo de unidades formadoras de colonias (UFC) para determinar la concentración bacteriana.

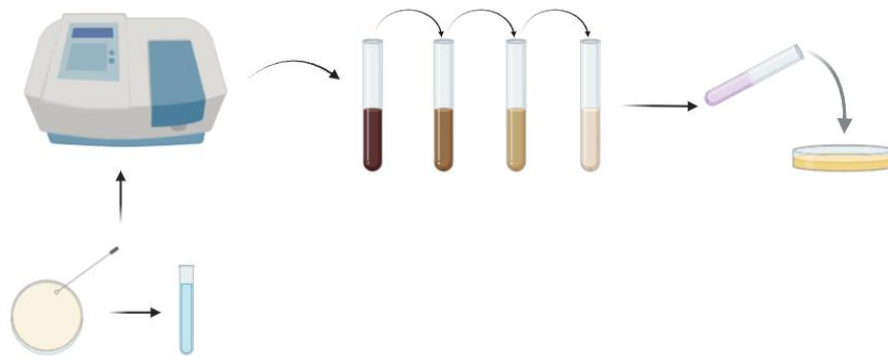


Figura 15. Esquema del método de McFarland.

10. Recuento bacteriano en placa.

Una vez preparadas las diluciones seriadas, se procedió a la siembra en medio sólido. De cada dilución, se tomaron **1000 μL** y se depositaron en cajas Petri de plástico estériles. Posteriormente, a cada caja se le añadieron 15 mL de agar nutritivo previamente esterilizado y fundido. Las cajas fueron homogenizadas cuidadosamente mediante movimientos circulares para asegurar una distribución uniforme de la suspensión bacteriana con el medio de cultivo.

Tras la gelificación del agar, las cajas se incubaron a 37 °C durante 16 horas en condiciones controladas. Finalmente, se llevó a cabo el recuento de colonias bacterianas para la cuantificación de *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*.

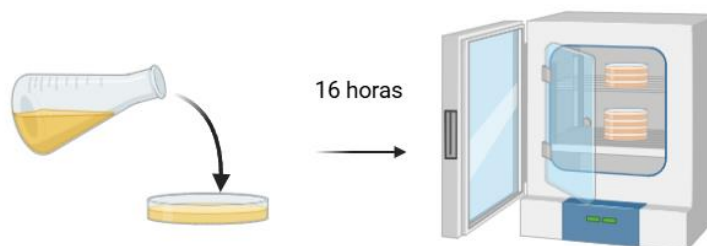


Figura 16. Plaqueo de las diluciones seriadas para posteriormente incubar.

CAPITULO 4.

RESULTADOS Y DISCUSION.

PARTE 1. Titanio puro.

1. Caracterización de morfología por SEM.

En la Figura 4.1, se presentan las micrografías obtenidas mediante SEM, correspondientes a las superficies anodizadas de titanio puro a 35 V. En la micrografía (A), con una magnificación de 70,000x, se observa una distribución homogénea de nanotubos de TiO_2 bien definidos, con diámetros regulares entre 80 y 120 nm, característica típica del proceso de anodizado en el rango de voltajes aplicado. La estructura presenta una morfología cilíndrica ordenada, lo que sugiere un crecimiento controlado de los nanotubos y una correcta autoorganización durante el proceso electroquímico.

En la micrografía (Figura 17, B), se aprecia una visión panorámica de la superficie anodizada, evidenciando la formación uniforme de la capa nanotubular sobre el sustrato metálico. Esta homogeneidad es indicativa de una excelente adherencia y continuidad estructural, factores esenciales para mantener la integridad mecánica y funcional del recubrimiento en aplicaciones posteriores. La morfología observada sugiere que las condiciones de anodizada empleada fueron adecuadas para la formación de nanotubos bien definidos, lo cual se espera que influya directamente en las propiedades fotocatalíticas, de adsorción superficial y antimicrobianas.

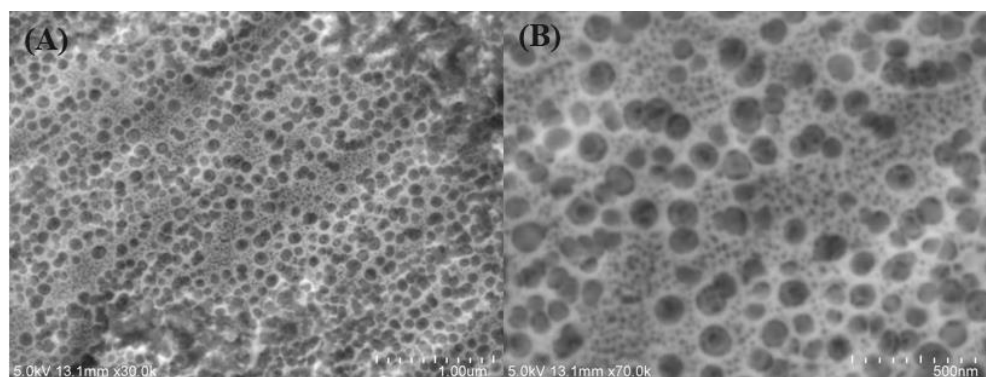


Figura 17. Análisis de superficie de Ti puro mediante SEM A) 5.0kV 13.1 mm x 30.0k B) 5.0kV 13.1 mm x 70.0k.

2. Cálculo del incremento del área expuesta

Para validar cuantitativamente la formación de nanotubos y estimar sus dimensiones, se realizó un análisis digital de imagen mediante el software *ImageJ*. En la Figura 18 A se muestra la Figura 18 B tratada en el *ImageJ* para poder cuantificar el número de huecos que corresponden a los nanotubos, y en la Figura 18 B, se utiliza la misma imagen para medir diez nanotubos y realizar un análisis estadístico de sus diámetros.

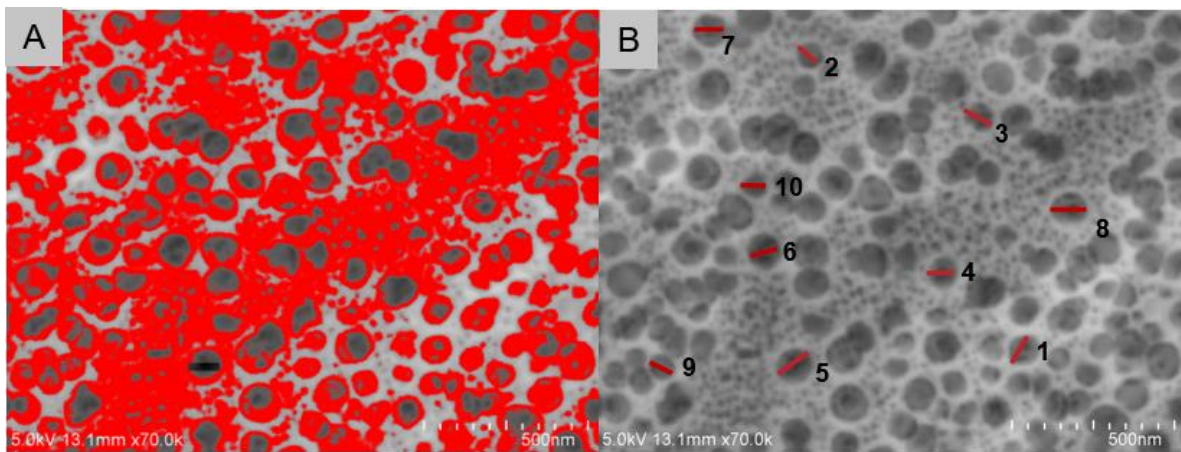


Figura 18. (A) Imagen total de nanotubos a 500 nm de los nanotubos de la aleación Titanio puro por medio de *ImageJ*
(B) Micrografía a 500 nm con medición de 10 nanotubos señalados.

En la tabla 1 se muestran el número de nanotubos, los cuales sus datos fueron obtenidos a través del procesamiento digital de la figura 18 (A) que incluyó la segmentación y conteo de las estructuras visibles en el campo de visión, resultando en la identificación de 156 nanotubos en un área total evaluada de $4.78 \mu m^2$. La relación entre el número de nanotubos y el área total analizada es un parámetro clave para estimar la cobertura superficial del material, así como para comparar la eficiencia del crecimiento de nanotubos bajo distintas condiciones experimentales. Para esta muestra de titanio puro, esta relación que denominaremos densidad superficial de nanotubos es de $32.6 \text{ nanotubos}/\mu m^2$.

Tabla 1. ImageJ total de nanotubos.

<i>Imagen</i>	<i>Numero</i>	<i>Área Total</i>
Nanotubos	156	4.78 μm^2

Para poder estimar el diámetro promedio, se procedió a analizar 10 nanotubos individualmente como se muestra en la figura 18 (B). En la tabla 2 se muestran el diámetro medido para cada nanotubo, el área de cada uno y en base a los resultados se calcularon sus promedios. Los diámetros evaluados oscilaron entre 77 nm y 106 nm, arrojando un promedio de 87 nm con una desviación estándar de 13 nm y un área promedio de 5,056 nm^2 .

Tabla 2. Calculo individual del área de los nanotubos.

<i>No</i>	<i>Diámetro (nm)</i>	<i>Área (nm^2)</i>
1	79	4902
2	77	4600
3	85	5675
4	96	7238
5	98	7543
6	81	5153
7	76	4536
8	104	8495
9	68	3632
10	106	8825
Promedio	87	6065

Por otro lado, en fotocátalisis, el aumento en el área de exposición impacta en un incremento en su actividad para la descontaminación del ambiente. Por lo tanto, al transformar la

superficie plana de las placas, en una superficie nanotubular con parámetros promedios de longitudes y diámetros, es posible estimar un incremento en el área de exposición tal y como se muestra en la Figura 19. Por ejemplo, al generar 3 nanotubos, el incremento del área se puede estimar sumando el área interior de los tres nanotubos, que se obtiene al multiplicar el perímetro por la longitud del nanotubo, como se muestra en la misma figura. En este trabajo, se va a utilizar entonces el diámetro promedio y una longitud estimada a partir del procedimiento propuesto por (ANZURES, 2023), en donde correlaciona el voltaje con la longitud de los nanotubos creados, que en este caso los 35 V, corresponden a partir de una extrapolación a la estimación de desarrollo de nanotubos con una longitud de 6200 nm. Con la ecuación 4 se puede estimar la razón del incremento de la superficie expuesta:

$$\frac{A_{nt}}{A_0} = \frac{n \times l_{prom} \times P_{prom}}{A_0} = \frac{n \times l_{prom} \times \pi d_{prom}}{A_0}$$

Ecuación 4. Incremento del área.

En donde A_{nt} es el área nueva con nanotubos, A_0 es el área inicial antes del proceso electroquímico, n es el número de nanotubos, l_{prom} es la longitud promedio de los nanotubos, P_{prom} es el perímetro promedio de los nanotubos y d_{prom} es el diámetro promedio de los nanotubos. Por lo tanto, en este caso la razón del incremento de área es:

$$\begin{aligned} \frac{A_0 + A_{nt}}{A_0} &= \frac{A_0 + n \times l_{prom} \times \pi d_{prom}}{A_0} = \frac{4.78 \mu m^2 + 156 \times 6.200 \mu m \times \pi \times 0.087 \mu m}{4.78 \mu m^2} \\ &= 56.3 \end{aligned}$$

Este resultado indica que aproximadamente existe un incremento alrededor de 50 veces el área inicial, lo que confirma que el anodizado es un proceso eficiente para lograr incrementos en la superficie expuesta de TiO_2 , lo que beneficia al proceso de fotocátalisis.

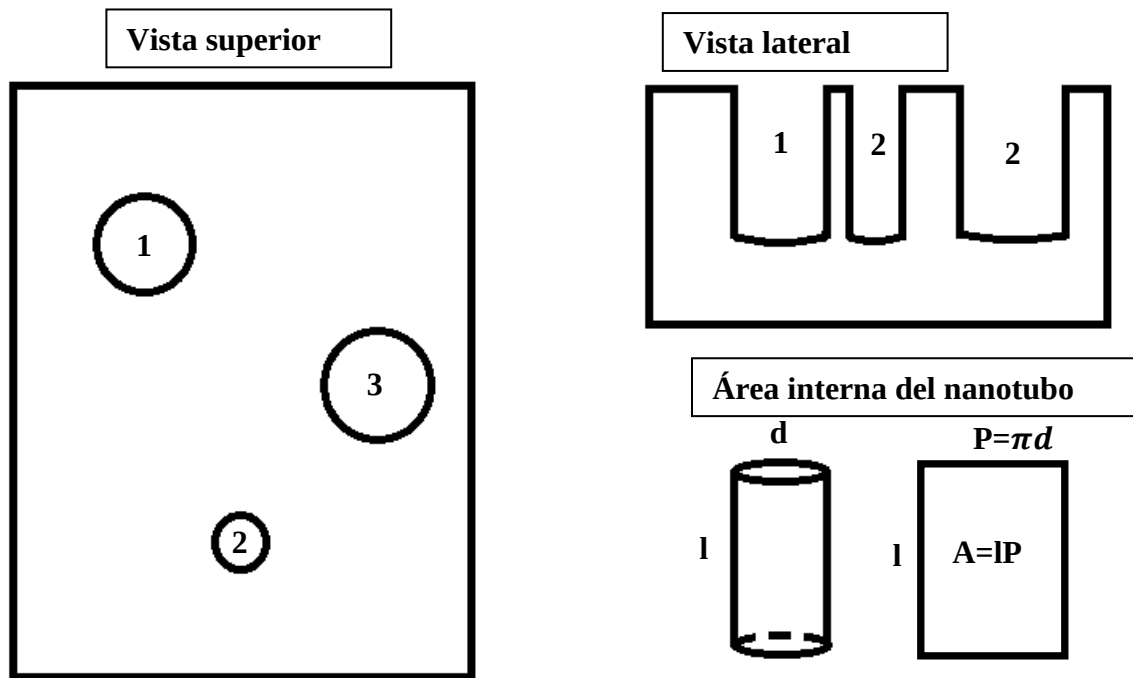


Figura 19. Esquema de la superficie modificada con 3 nanotubos.

3. Espectroscopia RAMAN.

Las mediciones Raman (Figuras 20 y 21) que corresponden a dos muestras de titanio puro por medio de un proceso de anodizado muestran características espectrales asociadas a transiciones vibracionales propias de TiO_2 . La respuesta registrada a potencia de 10 mW indica la presencia de fases cristalinas activas del material, compatibles con anatasa y rutilo e indica en la figura cuales son, la presencia de intensidades bien definidas en ambas zonas sugiere la coexistencia de estructuras policristalinas, típico en materiales obtenidos por anodización. (Aniket Balapure J. R., 2023)

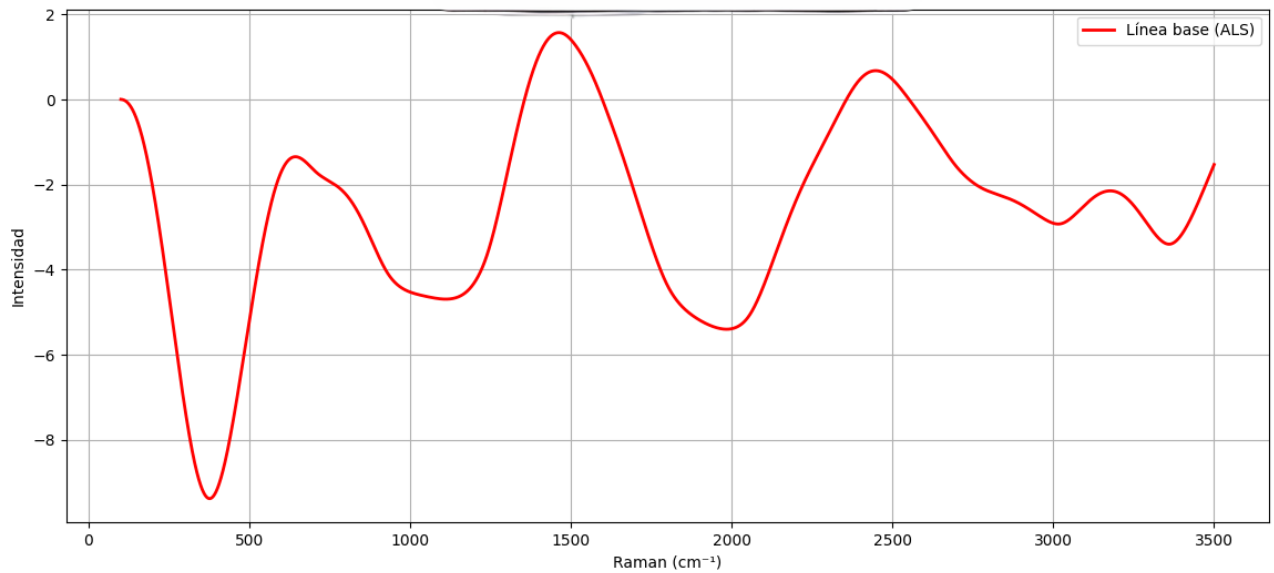


Figura 20. Espectroscopia Raman 10 mW zona 1.

La confirmación de estas fases cristalinas es esencial:

- **La fase anatasa** favorece la generación y transporte de pares electrón-hueco, aumentando la fotocataliticidad.
- **La fase rutilo** actúa como conductor electrónico que minimiza recombinaciones.

La interacción anatasa–rutilo favorece la separación de cargas, por lo que la coexistencia de las dos fases explica en parte los resultados antimicrobianos observados posteriormente.

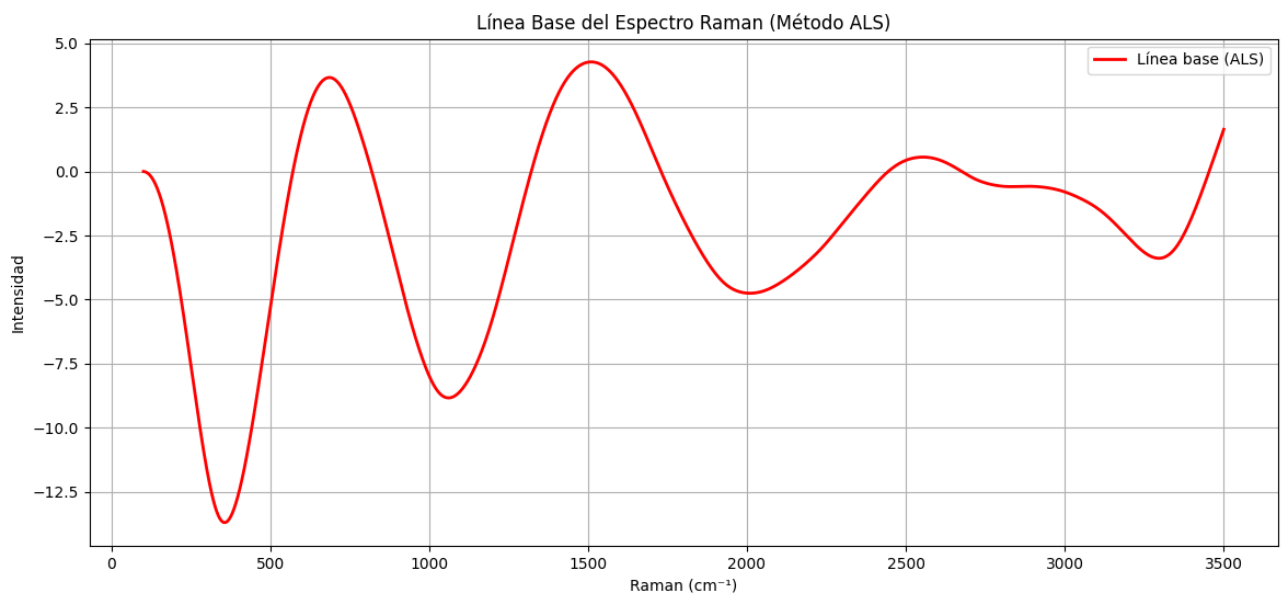


Figura 21. Espectroscopia Raman 10 mW zona 2.

4. Espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos-X (XPS).

El espectro de fotoelectrones de rayos X (XPS) de barrido amplio mostrado en la Figura 4.6 permite identificar de manera cualitativa y semicuantitativa los elementos químicos presentes en la superficie del material, así como sus principales estados electrónicos. El análisis se realizó en un rango de energía de unión aproximado de 0 a 1400 eV, característico de un *survey scan*, el cual se emplea para confirmar la composición superficial del sistema Ti/TiO₂.

En el espectro se observan picos intensos correspondientes a titanio (Ti) y oxígeno (O), lo que confirma la formación de una capa de óxido de titanio sobre el sustrato metálico. A partir del análisis semicuantitativo del espectro, se determinaron los porcentajes atómicos superficiales (at. %), observándose que el oxígeno presenta una mayor proporción relativa en comparación con el titanio, lo cual es consistente con la formación de TiO₂. La relación atómica O/Ti obtenida se aproxima al valor estequiométrico esperado (~ 2), lo que sugiere una oxidación predominante del titanio en la superficie.

El pico correspondiente a O 1s, localizado alrededor de 530–532 eV, es característico del oxígeno enlazado químicamente al titanio en forma de TiO₂. Su alta intensidad indica una cobertura superficial significativa del óxido. Este pico puede descomponerse en contribuciones asociadas al oxígeno de red (O²⁻) y a grupos hidroxilo superficiales (–OH), los cuales son comunes en materiales de TiO₂ expuestos al ambiente. La presencia de estos grupos hidroxilo es particularmente relevante, ya que favorece procesos de adsorción, actividad fotocatalítica y propiedades antimicrobianas. (Figura 22)

Los picos asociados a Ti 2p, visibles aproximadamente en 458–465 eV, corresponden a las transiciones Ti 2p_{3/2} y Ti 2p_{1/2}. La posición del pico Ti 2p_{3/2} alrededor de ~ 458.5 eV es característica del titanio en estado de oxidación Ti⁴⁺, confirmando la presencia predominante de TiO₂. No obstante, ligeros desplazamientos o ensanchamientos en estos picos pueden indicar la posible presencia de estados subóxidos de titanio (Ti³⁺), asociados a defectos de oxígeno o vacancias en la red cristalina, los cuales pueden influir en la reactividad superficial y en las propiedades electrónicas del material.

Adicionalmente, se identifican señales correspondientes a Ti 3s, Ti 3p y Ti 2s, ubicadas aproximadamente en 60 eV, 35–40 eV y 560–570 eV, respectivamente. Aunque estos picos presentan menor intensidad, su presencia refuerza la correcta asignación del titanio como elemento mayoritario en la superficie analizada. El espectro también muestra un pico asociado a C 1s, localizado alrededor de 284.8 eV, el cual se atribuye a contaminación adventicia de carbono, común en análisis XPS debido a la exposición del material al ambiente. Este pico se utiliza habitualmente como referencia para la corrección de carga superficial. (Aniket Balapure J. R., 2023)

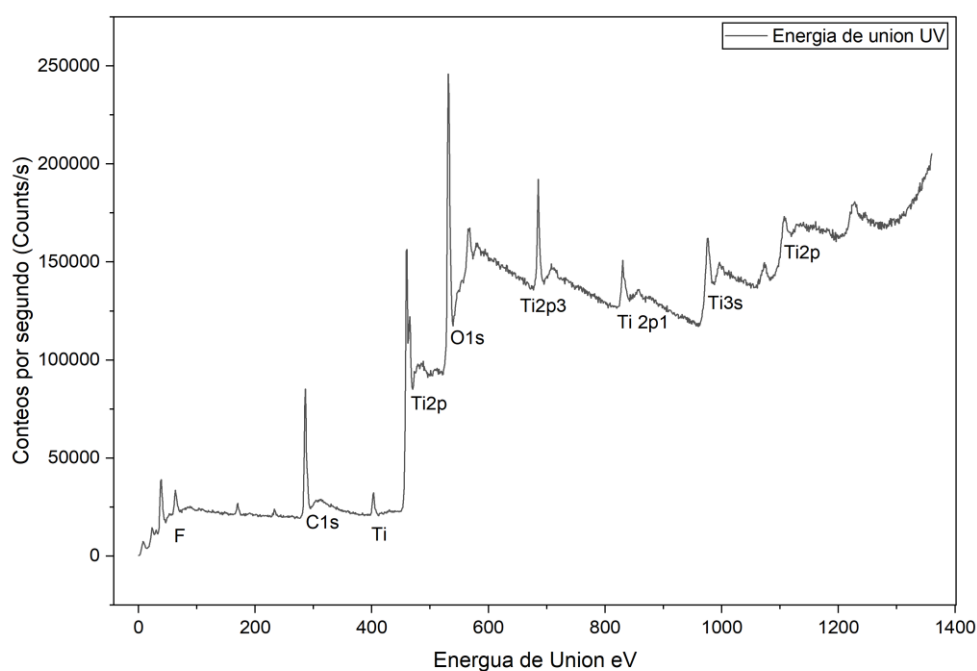


Figura 22. XPS muestra de Titanio puro anodizado.

Los picos asociados a Ti 2p, visibles aproximadamente en 458–465 eV, corresponden a las transiciones $Ti\ 2p_{3/2}$ y $Ti\ 2p_{1/2}$, típicas del titanio en estado de oxidación Ti^{4+} , confirmando que el titanio superficial se encuentra predominantemente oxidado y no en estado metálico.

Asimismo, se detecta una señal de flúor (F), la cual puede estar relacionada con residuos del electrolito empleado durante el proceso de anodización electroquímica, particularmente en soluciones que contienen iones fluoruro. La presencia de flúor es relevante, ya que desempeña un papel clave en la formación de nanotubos de TiO_2 , al favorecer la disolución química localizada del óxido y permitir el crecimiento ordenado de estructuras tubulares.

Además, la incorporación de flúor en la superficie puede modificar las propiedades fisicoquímicas del material, incluyendo su energía superficial, humectabilidad y actividad catalítica, lo que potencialmente impacta su desempeño en aplicaciones antimicrobianas y fotocatalíticas (Danila M. Korotin, 2012).

5. Espectroscopia UV-Vis.

El análisis por espectroscopía UV-Vis se utilizó para determinar la energía de banda prohibida (E_g) de las muestras de titanio puro mediante el método de Tauc, con transición indirecta permitida. Para ello, los espectros de absorbancia fueron transformados empleando la relación $(F(R)h\nu)^{1/2}$ en función de la energía del fotón $h\nu$, permitiendo la identificación de la región lineal característica de la absorción óptica.

Las mediciones UV-Vis (Figura 23) muestran absorción característica de TiO_2 en el rango UV para dos muestras de titanio puro que fueron anodizadas. La absorción observada se correlaciona con el comportamiento fotocatalítico observado en pruebas microbiológicas: la generación de especies reactivas de oxígeno está mediada por la activación electrónica inducida por luz.

La comparación entre ambas muestras evidencia que, aunque el titanio puro mantiene una energía de banda relativamente alta, existen variaciones sutiles entre muestras individuales. Esto es esperable en materiales metálicos tratados o modificados mediante diferentes procesos fisicoquímicos, ya que pequeñas alteraciones en la microestructura a nivel superficial pueden influir en la transición óptica indirecta. En términos de aplicación, la obtención de valores de E_g en el rango de **3.17–3.25 eV** confirma que el titanio puro presenta un carácter semiconductor con potencial utilidad en aplicaciones fotocatalíticas, recubrimientos y superficies fotoactivas bajo radiación UV.

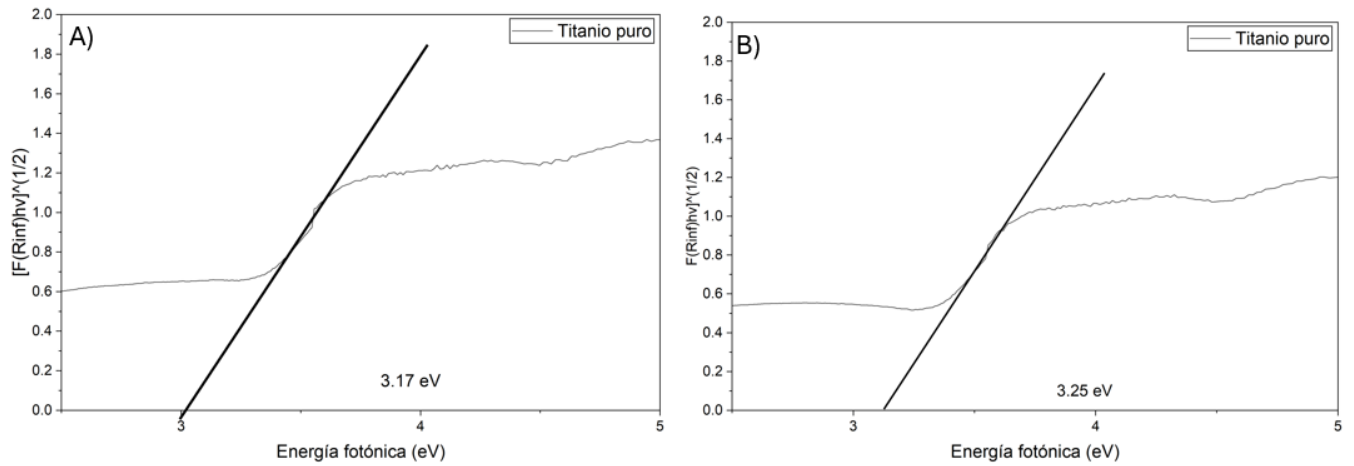


Figura 23. Espectroscopia UV-Vis A) muestra 1 titanio puro anodizado B) muestra 2 titanio puro anodizado.

6. Difracción de rayos-X.

El difractograma correspondiente a la muestra de titanio puro muestra picos de difracción intensos y bien definidos, característicos del titanio α (alfa) con estructura cristalina hexagonal compacta (HCP) (ver Figura 24). Las reflexiones más intensas se observan en torno a $2\theta \approx 35.1^\circ$, 38.4° , 40.2° , 53.0° , 63.0° y 70.6° , las cuales se asignan a los planos α -Ti (100), (002), (101), (102), (110) y (103). La alta intensidad y estrechez de estos picos indican una elevada cristalinidad del sustrato metálico y la ausencia de deformaciones significativas en la red cristalina.

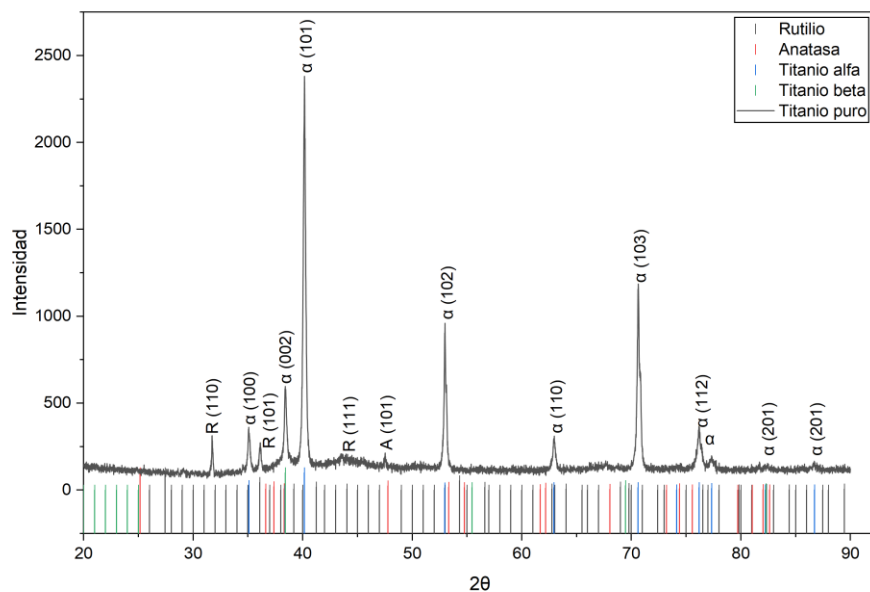


Figura 24. Difracción de rayos-X en muestra de titanio puro.

Adicionalmente, se identifican señales de baja intensidad asociadas a fases de óxido de titanio, particularmente anatasa y rutilo, evidenciadas por reflexiones débiles en torno a $2\theta \approx 25.3^\circ$ (A (101)) y 27.4° (R (110)). La presencia de estas fases puede atribuirse a la oxidación superficial natural del titanio al estar expuesto al ambiente, formando una capa pasiva de TiO_2 de espesor nanométrico, la cual no domina el patrón de difracción debido a su baja fracción volumétrica.

La ausencia de picos correspondientes a la fase β del titanio confirma que la muestra se encuentra en condiciones termodinámicas estables a temperatura ambiente, sin transformaciones de fase inducidas por tratamiento térmico previo. Estos resultados son consistentes con reportes recientes donde el titanio comercialmente puro presenta predominantemente fase α , con óxidos superficiales detectables únicamente como contribuciones secundarias en XRD convencional. (R. Cancedda, 2017)

El patrón de difracción correspondiente a la muestra con nanotubos de TiO_2 formados sobre titanio puro evidencia cambios significativos respecto al sustrato metálico. Aunque los picos dominantes del titanio α aún son visibles, se observa una disminución relativa de su intensidad, atribuida a la presencia de una capa nanotubular de óxido que atenúa la señal proveniente del sustrato. Las reflexiones más intensas de α -Ti permanecen en posiciones similares al de la difracción de la muestra sin nanotubos (Figura 24), confirmando que el proceso de anodización no altera la estructura cristalina del titanio base, solo incrementa la intensidad de las difracciones de los óxidos. (Figura 25)

Como se puede ver, en este difractograma (Figura 25) se identifican con mayor claridad picos asociados a la fase anatasa del TiO_2 , particularmente el plano A (101) alrededor de 25.3° y contribuciones menos intensas correspondientes a A (004) y A (200). La aparición de anatasa se asocia a la oxidación electroquímica durante la anodización, donde se forma inicialmente una fase amorfa o parcialmente cristalina de TiO_2 que puede presentar núcleos de anatasa detectables por XRD, aun sin tratamiento térmico posterior.

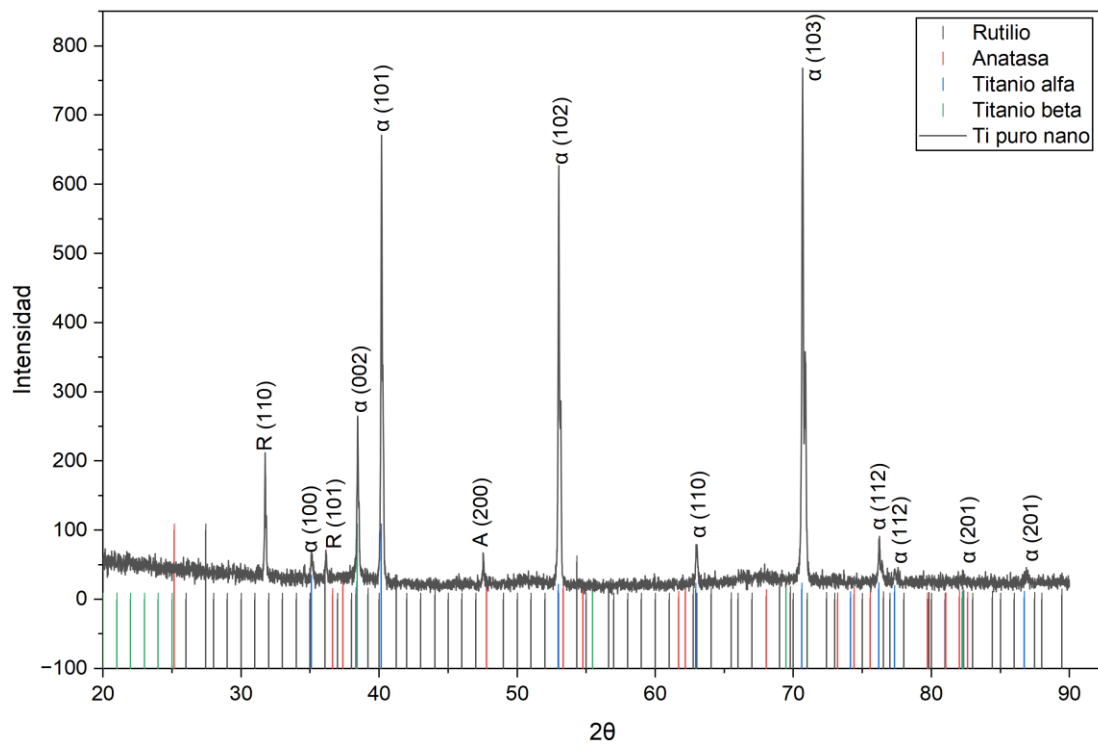


Figura 25. Difracción de rayos-x de nanotubos en titanio puro.

Asimismo, se detectan picos débiles correspondientes a la fase rutilo, especialmente el plano R (110), lo cual sugiere una coexistencia de fases en la capa de óxido. Esta mezcla de anatasa y rutilo ha sido ampliamente reportada en nanotubos de TiO_2 anodizados, y es relevante desde el punto de vista funcional, ya que la interfase entre ambas fases puede favorecer la separación de pares electrón-hueco, mejorando el desempeño fotocatalítico y antimicrobiano del material. (Macak, 2021)

Con la finalidad de comprobar si los óxidos desarrollados previamente con el proceso electroquímico tienen una parte amorfa, estos fueron sometidos a un tratamiento térmico. El difractograma de la muestra de nanotubos de TiO_2 sometidos a tratamiento térmico a 450°C durante 2 horas presenta una evolución clara en la estructura cristalina del óxido. Se observa un incremento notable en la intensidad y definición de los picos correspondientes a la fase anatasa, lo cual indica una cristalización efectiva del TiO_2 previamente amorfo. El plano A (101) se convierte en la reflexión dominante, acompañado de picos bien definidos asociados

a A (004), A (200), A (211) y A (204), confirmando la formación de más capa de anatasa cristalina. (Figura 26)

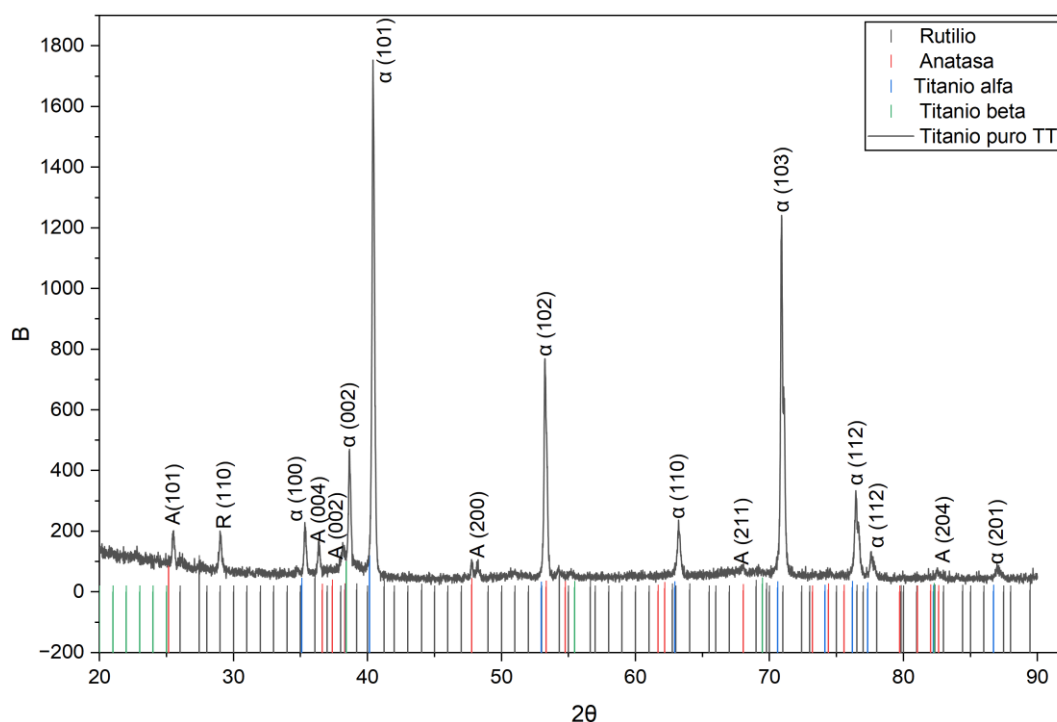


Figura 26. Difracción de rayos-x nanotubos con tratamiento térmico a 450 °C en titanio puro.

Paralelamente, los picos del titanio α del sustrato permanecen visibles, aunque con menor intensidad relativa debido al aumento del espesor efectivo y cristalinidad de la capa de óxido. Es importante destacar que no se observa una transformación completa hacia la fase rutilo, lo cual es coherente con reportes que indican que temperaturas cercanas a 450 °C favorecen la estabilización de la anatasa sin inducir su conversión masiva a rutilo, proceso que suele ocurrir a temperaturas superiores a 600–700 °C. (Susan P. Krumdieck, 2019)

La presencia de anatasa cristalina tras el tratamiento térmico es particularmente relevante para aplicaciones antimicrobianas y fotocatalíticas, ya que esta fase presenta una mayor actividad bajo irradiación UV debido a su adecuada estructura de bandas y menor tasa de recombinación electrón-hueco. Por tanto, el tratamiento térmico aplicado no solo mejora la cristalinidad del material, sino que optimiza sus propiedades funcionales sin comprometer la integridad estructural de los nanotubos. (Sunada, 2003)

7. Condiciones experimentales de fotocátalisis en bacterias.

Cada muestra de titanio puro sin el tratamiento térmico (TT) fue expuesta a diferentes condiciones de tratamiento:

- **NA – UV:** superficie sin anodizar y sin radiación UV (control negativo).
- **NA + UV:** superficie sin anodizar, pero irradiada con UV.
- **A – UV:** superficie anodizada sin exposición a UV (solo efecto del anodizado).
- **A + UV:** superficie anodizada y sometida a radiación ultravioleta (proceso fotocatalítico completo).

Como control positivo se utilizó el inóculo bacteriano estandarizado según la **escala de McFarland** (26×10^6 UFC/mL), que representa el crecimiento normal esperado sin ningún tratamiento.

Después del contacto con las muestras, los cultivos fueron recuperados, diluidos y sembrados en cajas Petri con agar nutritivo. Las placas se incubaron a 37 °C durante 16 horas, permitiendo cuantificar el número de unidades formadoras de colonias (UFC) como indicador del crecimiento bacteriano.

7.1 Pruebas antibacterianas por fotocátalisis.

Las pruebas microbiológicas realizadas con titanio puro anodizado permitieron evaluar la actividad fotocatalítica y antimicrobiana del material frente a *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*, dos bacterias representativas de patógenos Gramnegativos. El propósito fue determinar en qué medida el proceso de anodización y la irradiación con luz ultravioleta (UV) contribuyen a la reducción del crecimiento bacteriano mediante mecanismos de fotocátalisis.

7.2 Resultados para E. coli.

Los resultados de las UFC a las distintas condiciones mencionadas arriba. El control presenta el número más alto de UFC lo que era esperado (Figura 27). Posteriormente al analizar el material sin nanotubos y sin irradiación UV (T1 NA-UV) existe una ligera disminución en el número de UFC, lo que sugiere que el Ti por sí solo tiene ya un efecto sobre las bacterias. Y si observamos al Ti con la irradiación de UV, este efecto se incrementa ligeramente (muestra T2 NA+UV), indicando también que la radiación UV provoca un efecto en detrimento del crecimiento de las colonias. Cuando se analiza la muestra con nanotubos y sin UV (T3 A-UV) el material tiene un efecto más importante sobre las UFC, ya que disminuyó de 98.6 hasta 70.6 al compararlo con el titanio sin nanotubos (T1 NA-UV), lo que significa que la funcionalización de la superficie incrementa este efecto antimicrobiano en el material. Finalmente, al irradiar con UV la superficie con nanotubos (T4 A+UV) es la condición en donde se encuentra el menor número de UFC. Sugiriendo entonces que al irradiar con UV la superficie nanotubular, se está llevando a cabo una eliminación de las colonias por fotocatalisis. (Figura 27)

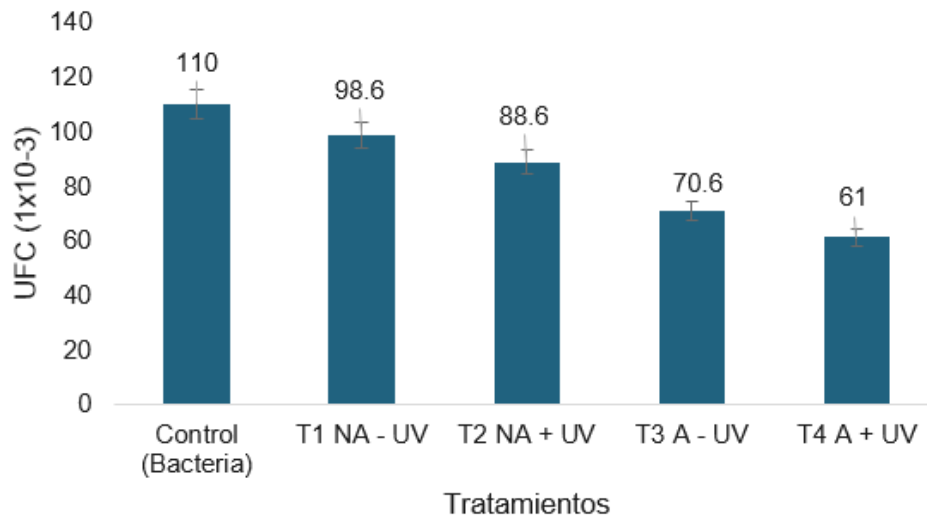


Figura 4.11. Unidades formadoras de colonias E. coli en Titanio puro.

La Tabla 3 muestra el porcentaje de inhibición de *Escherichia coli* calculado para cada uno de los tratamientos aplicados sobre superficies de titanio puro, tomando como referencia el control bacteriano, al cual se le asignó un 0 % de inhibición. El tratamiento T1 NA – UV

presenta el valor más bajo de inhibición, con apenas 1.4 %, confirmando que el titanio puro sin tratamiento superficial ni irradiación no posee una actividad antibacteriana relevante. En conjunto, la tabla permite cuantificar de manera clara el efecto relativo de cada tratamiento, destacando la importancia del anodizado y de la irradiación UV como factores clave en la inhibición del crecimiento de *E. coli* sobre superficies de titanio puro. (Mingzhu Zhou, 2024)

Mientras que el tratamiento T2 NA + UV muestra un porcentaje de inhibición menor, de 11.4 %, lo que sugiere que la irradiación UV sin anodizado tiene un efecto limitado sobre la inhibición bacteriana. Por su parte, el tratamiento T3 A – UV alcanza un 29.4 % de inhibición, lo que indica que el anodizado por sí solo contribuye de manera significativa a la reducción de *E. coli*, incluso en ausencia de radiación UV. Finalmente, el tratamiento T4 A + UV presenta el mayor porcentaje de inhibición, con un valor de 39 %, confirmando que la combinación de anodizado e irradiación ultravioleta es la condición más efectiva para reducir el crecimiento bacteriano.

Este comportamiento se atribuye a la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) como radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) y superóxido ($\text{O}_2^{\bullet-}$)— por efecto de la radiación UV sobre los nanotubos de TiO_2 formados durante el anodizado. Dichas especies poseen un alto potencial oxidante, capaz de alterar la membrana citoplasmática, desnaturalizar proteínas y fragmentar el ADN bacteriano. (Sunada, 2003).

Tabla 3. Porcentaje de inhibición *E. coli* en Titanio puro.

Tratamiento	% de inhibición
Control (bacteria)	0
T1 NA-UV	1
T2 NA + UV	11
T3 A-UV	29
T4 A +UV	39

En la fila A + UV se observa una reducción evidente en la densidad y tamaño de las colonias bacterianas, atribuida al efecto combinado de la superficie anodizada y la irradiación ultravioleta. En la condición NA – UV, correspondiente a muestras sin anodización y sin exposición a radiación UV, se aprecia un crecimiento bacteriano considerable, aunque

inferior al del control. El control bacteriano muestra un crecimiento homogéneo y abundante de colonias, confirmando la viabilidad del inóculo y la ausencia de inhibición antimicrobiana en ausencia del material y la irradiación. (Figura 27)

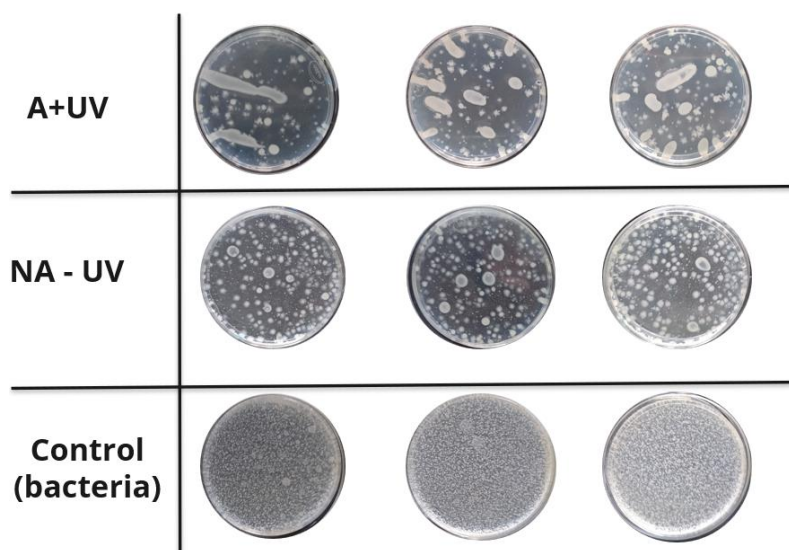


Figura 27. Representación visual de los resultados en pruebas antimicrobianas Titanio puro en *E.coli*.

7.3 Resultados en *P. aeruginosa*.

En la Figura 28 se observó un comportamiento similar frente a *Pseudomonas aeruginosa*, aunque con ligeras diferencias en el nivel de inhibición. En la muestra T1 NA – UV (titanio no anodizado sin irradiación UV) se observa una reducción moderada en el número de colonias (139.6×10^3 UFC/mL) respecto al control, lo cual puede atribuirse al efecto pasivo del titanio y a la formación espontánea de una capa superficial de óxido. Sin embargo, esta disminución no es suficiente para considerarse un efecto antimicrobiano significativo. Por otro lado, la muestra T3 A – UV (titanio anodizado sin irradiación UV) presenta un valor similar ($\approx 71 \times 10^3$ UFC/mL), lo que indica que la modificación superficial mediante anodización, asociada a la formación de nanotubos de TiO_2 , genera un efecto bacteriostático incluso en ausencia de irradiación. Este comportamiento se relaciona con el aumento del área superficial y la interacción física entre la superficie nanotubular y las bacterias. El tratamiento A + UV produjo una disminución significativa de las colonias, alcanzando un porcentaje de inhibición aproximado del 85–88%, ligeramente inferior al observado en *E. coli*.

Finalmente, la condición T4 A + UV exhibe el menor recuento bacteriano, demostrando un efecto sinérgico entre la anodización y la irradiación UV. Esta reducción significativa se atribuye a la activación fotocatalítica del TiO₂, que genera especies reactivas de oxígeno (ROS), como radicales hidroxilo y superóxidos, responsables del daño oxidativo en las células bacterianas. (María C. Nevárez-Martínez, 2017)

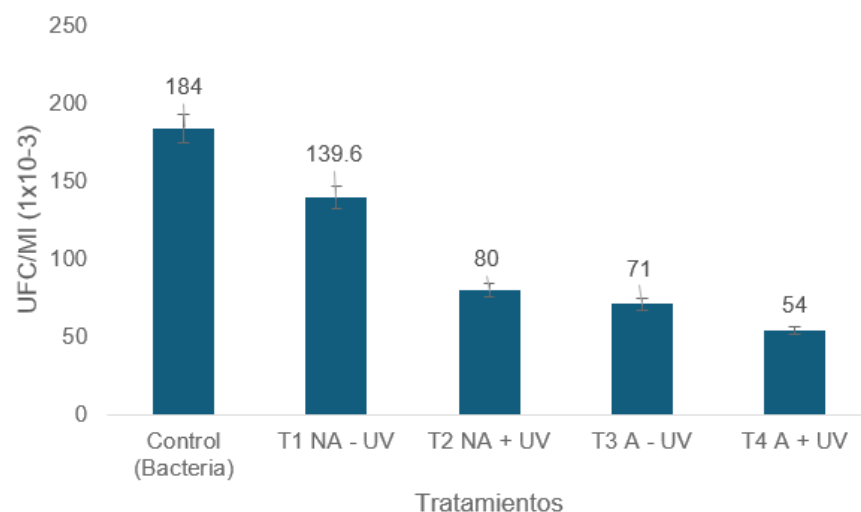


Figura 28. Unidades formadoras de colonias en *P. aeruginosa*.

En la tabla 4, la variación del porcentaje de inhibición explica que debido a la estructura de la pared celular más compleja de *P. aeruginosa*, que contiene una capa externa lipídica más resistente a la penetración de ROS, además de mecanismos de defensa antioxidante más eficientes. Sin embargo, el efecto fotocatalítico sigue siendo notable, ya que los recuentos bacterianos fueron considerablemente menores que en los controles sin tratamiento. Los tratamientos NA + UV y NA – UV reportaron la mayor cantidad de colonias, confirmando que la irradiación por sí sola no produce un efecto bactericida significativo sin la presencia de una superficie fotocatalíticamente activa.

En las condiciones A – UV, la reducción fue moderada, indicando nuevamente que el anodizado contribuye parcialmente a la inhibición bacteriana, posiblemente debido a una menor adherencia o a la presencia de cargas electrostáticas negativas en la superficie del óxido.

Tabla 4. Porcentaje de inhibición en *P. aeruginosa*.

Tratamiento	% de inhibición
Control (bacterias)	0
T1 NA – UV	14.4
T2 NA + UV	20
T3 A – UV	29
T4 A+ UV	46

La figura 29 muestra el crecimiento bacteriano en placas de cultivo bajo tres condiciones distintas: A+UV, NA–UV y Control (bacteria), cada una representada por tres réplicas experimentales. En la condición A+UV, correspondiente a las muestras con nanotubos de TiO₂ activados mediante irradiación ultravioleta, se observa una reducción significativa en el número de colonias bacterianas, así como zonas extensas con ausencia de crecimiento, lo que indica una alta actividad antimicrobiana atribuida al efecto fotocatalítico del material.

En contraste, las placas correspondientes a la condición NA–UV (nanotubos sin activación por radiación UV) presentan un mayor número de colonias bacterianas, con una distribución más homogénea sobre la superficie del medio de cultivo, lo que sugiere que, en ausencia de irradiación UV, el efecto antimicrobiano del material se ve considerablemente disminuido.

Por su parte, el control bacteriano muestra un crecimiento abundante y continuo de colonias, característico de un desarrollo bacteriano sin ningún tipo de tratamiento inhibitorio. La comparación entre las tres condiciones evidencia que la combinación de nanotubos de TiO₂ y radiación UV potencia de manera notable la inhibición del crecimiento bacteriano, confirmando el papel clave de la activación fotocatalítica en el mecanismo antimicrobiano del sistema evaluado.

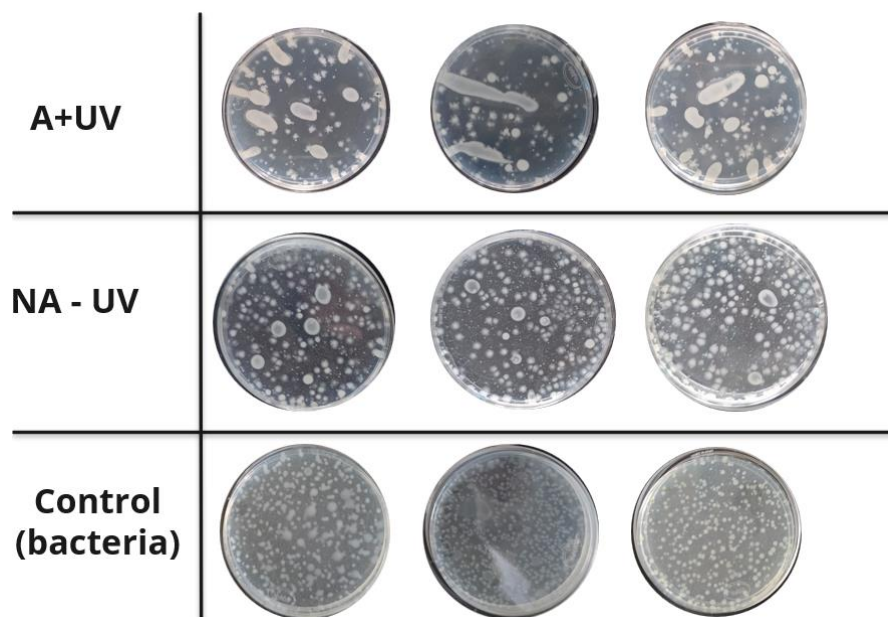


Figura 29. Representación visual de los resultados en pruebas antimicrobianas Titanio puro en *P. aeruginosa*.

Al comparar ambas especies bacterianas, se observa que:

- *E. coli* fue más susceptible al tratamiento fotocatalítico, mostrando una mayor reducción de las colonias bajo A + UV.
- *P. aeruginosa* presentó una resistencia ligeramente mayor, aunque también fue significativamente afectada por la fotocátalisis.

Esto sugiere que la eficiencia del proceso depende no solo de la estructura nanotubular del TiO_2 , sino también de la composición y morfología de la envoltura bacteriana. Los resultados demuestran que el titanio puro anodizado posee una actividad antimicrobiana intrínseca, la cual se potencia considerablemente bajo irradiación UV. El mecanismo predominante es la fotocátalisis heterogénea, donde los nanotubos de TiO_2 actúan como semiconductores: al absorber fotones de energía suficiente ($\lambda = 365 \text{ nm}$), se generan pares electrón-hueco (e^-/h^+) que inician reacciones redox en la superficie. Los huecos (h^+) oxidan moléculas de agua o grupos hidroxilo adsorbidos para formar radicales $\bullet\text{OH}$, mientras que los electrones (e^-) reducen oxígeno disuelto para generar $\text{O}_2\bullet^-$. Estos hallazgos corroboran la hipótesis de que el anodizado incrementa la eficiencia fotocatalítica del titanio al generar una morfología nanotubular altamente ordenada, que favorece la absorción de radiación UV y la separación eficiente de cargas fotoinducidas. (Luis Escobar-Alarcón, 2021)

PARTE 2. Ti-407.

1. Microscopía electrónica de barrido.

Las micrografías de SEM (Figura 30 A y B), obtenidas muestran la morfología superficial del Ti-407 tras el proceso de anodizado a un potencial de 45V durante 30 minutos. En ambas imágenes se observa la formación de una estructura nanoporosa altamente desarrollada, característica del crecimiento electroquímico de óxidos de titanio bajo condiciones experimentales. La superficie presenta una distribución relativamente homogénea lo que sugiere un proceso de anodizado estable y controlado.

En la micrografía A se distingue una región cercana a un borde superficial, donde la capa anodizada exhibe variaciones en el tamaño y profundidad de los poros. Estas características indican que, aunque el crecimiento del óxido es predominantemente uniforme. Por otro lado, la micrografía B corresponde a un acercamiento de A, donde se aprecia una superficie continua y compacta de poros nanométricos, con un alto grado de ordenamiento entre ellos sugiriendo un incremento del área superficial.

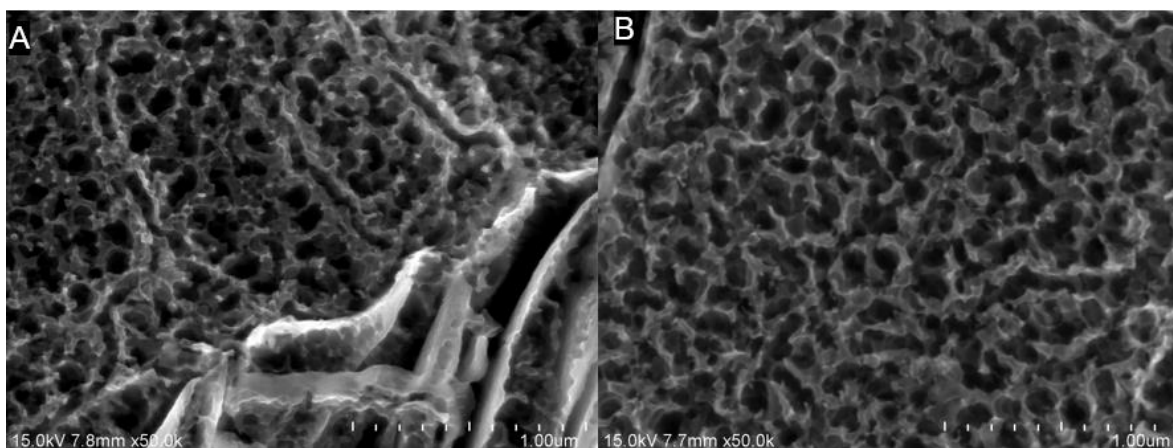


Figura 30. Micrografía de SEM de la superficie de Ti-407 anodizado a 45V durante 30 min.

2. Cálculo del incremento del área expuesta.

Para validar cuantitativamente la formación de nanoestructuras y estimar sus dimensiones, se realizó un análisis digital de imagen mediante el software *ImageJ*. En la Figura 4. 16 se observa una superficie completamente cubierta por nanotubos con una distribución uniforme y morfología cilíndrica bien definida. En la Figura 31 A se muestra la imagen 31 B tratada en el *ImageJ* para poder cuantificar el número de huecos que corresponden a los nanotubos, y en la Figura 31 B, se utiliza la misma imagen para medir diez nanotubos y realizar un análisis estadístico de sus diámetros.

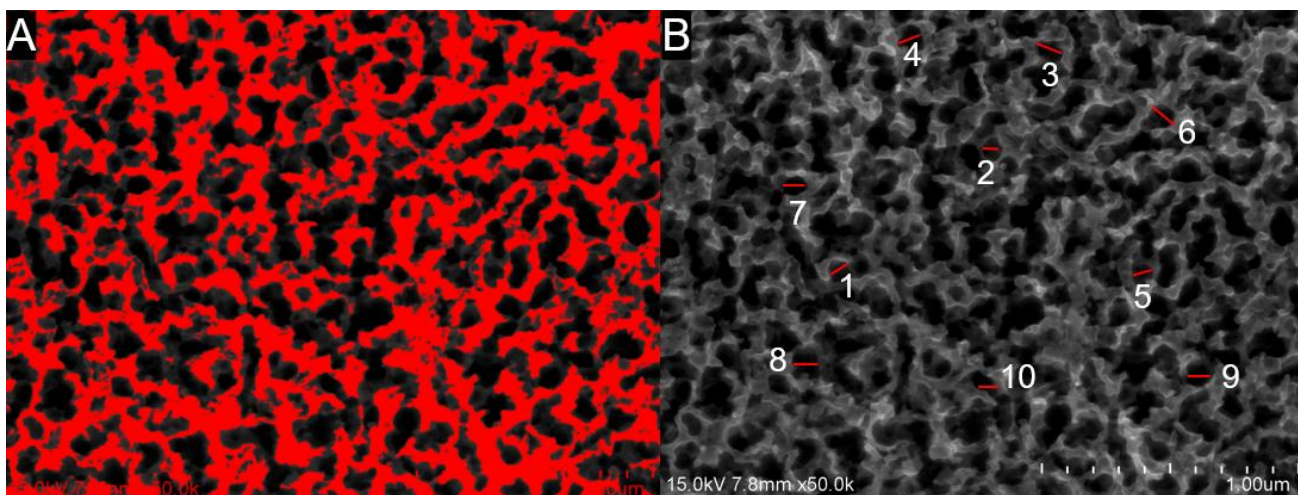


Figura 31. A) Imagen total de nanotubos a 1.00 μm B) medición de 10 nanotubos.

En la tabla 5 se muestran el número de nanotubos, los cuales sus datos fueron obtenidos a través del procesamiento digital de la figura 31 (A) que incluyó la segmentación y conteo de las estructuras visibles en el campo de visión, resultando en la identificación de 1277 nanotubos en el área total evaluada $12.78 \mu\text{m}^2$. La relación entre el número de nanotubos y el área total analizada es un parámetro clave para estimar la cobertura superficial del material, así como para comparar la eficiencia del crecimiento de nanotubos bajo distintas condiciones experimentales.

Tabla 5. Total de nanotubos en 1 μm .

Imagen	Numero	Área total
TI-407	1277	12.78 μm^2

Para poder estimar el diámetro promedio, se procedió a analizar los 10 nanotubos identificados en la figura 31 (B). En la tabla 6 se muestran el diámetro medido para cada nanotubo, el área de cada uno y en base a los resultados se calcularon sus promedios. Los diámetros evaluados oscilaron entre 59 nm y 109 nm, arrojando un promedio de 78.9 nm con una desviación estándar de 15 nm y un área promedio de 5,040 nm^2 . Aunque el promedio es similar a los del titanio puro, la aleación Ti-4047 presenta una mayor dispersión de resultados y además, en la figura se puede apreciar que algunos huecos coleasen entre ellos. No obstante, a esto, se realizará el mismo cálculo empleado en el titanio puro, para determinar un incremento de área.

Tabla 6. Medidas de 10 nanotubos.

No	Diámetro nm	Área nm^2
1	76	4536
2	68	3632
3	96	7238
4	81	5153
5	59	2734
6	73	4185
7	67	3526
8	82	5281
9	109	9331
10	78	4778

Promedio	78.9	5040
----------	------	------

Posterior a este análisis, entonces, se realizó el mismo cálculo del incremento del área superficial utilizada anteriormente como ya se mencionó. Para esto estimó una longitud promedio de 10.30 μm con el procedimiento propuesto por Anzures (2023) empleando para la aleación Ti-407 un voltaje de 45 V y el diámetro promedio de 78.9 nanómetros obtenido de los valores de la tabla 6. En la siguiente operación de la ecuación 5 se muestra el resultado obtenido del incremento de área.

$$\frac{A_0 + A_{nt}}{A_0} = \frac{A_0 + n \times l_{prom} \times \pi d_{prom}}{A_0}$$

$$= \frac{12.78 \mu\text{m}^2 + 1277 \times 10.30 \mu\text{m} \times \pi \times 0.0789 \mu\text{m}}{12.78 \mu\text{m}^2} = 256$$

Ecuación 5. Incremento del área Ti-407.

Este resultado indica de acuerdo con esta ecuación para la aleación Ti-407 se da un incremento en el área expuesta de aproximadamente 250 veces. Lo anterior sugiere que, aunque la desviación estándar es mayor para esta aleación, empleando la misma ecuación y procedimiento que para el titanio puro que su incremento fue de 50 veces, el proceso electroquímico empleado en este trabajo debe de causar un incremento en área más importante para la aleación Ti-407 que para el Ti puro (250/50=5 veces más grande). Lo anterior tiene que ser tomado en cuenta para la actividad fotocatalítica de ambas muestras.

3. Espectroscopia de energía dispersiva (EDS).

La espectroscopia de energía dispersiva realizada sobre la superficie anodizada de Ti-407 permitió determinar la composición elemental del recubrimiento nanotubular formado. En la Figura 32 se aprecia el espectro resultante, donde se identifican los picos característicos correspondientes a los elementos constituyentes del material. El pico más intenso se atribuye al titanio (Ti), elemento base de la aleación, cuya señal domina ampliamente el espectro

debido a su alta concentración superficial. La presencia de un máximo bien definido confirma que la mayor proporción de la matriz se mantiene como titanio oxidado tras el proceso de anodización.

Además del titanio, el análisis revela señales asociadas a flúor (F), aluminio (Al), silicio (Si) y vanadio (V), elementos también presentes en la composición química de la aleación o introducidos durante el proceso electroquímico. La señal del flúor, localizada en la zona de baja energía, es particularmente relevante, ya que este elemento proviene del electrolito empleado durante la anodización. Su interacción con el titanio favorece la disolución localizada y la formación de cavidades ordenadas, lo cual es esencial para el crecimiento de nanotubos. Este comportamiento se traduce en un proceso más estable y eficiente, capaz de generar estructuras con paredes más definidas y con mayor uniformidad.

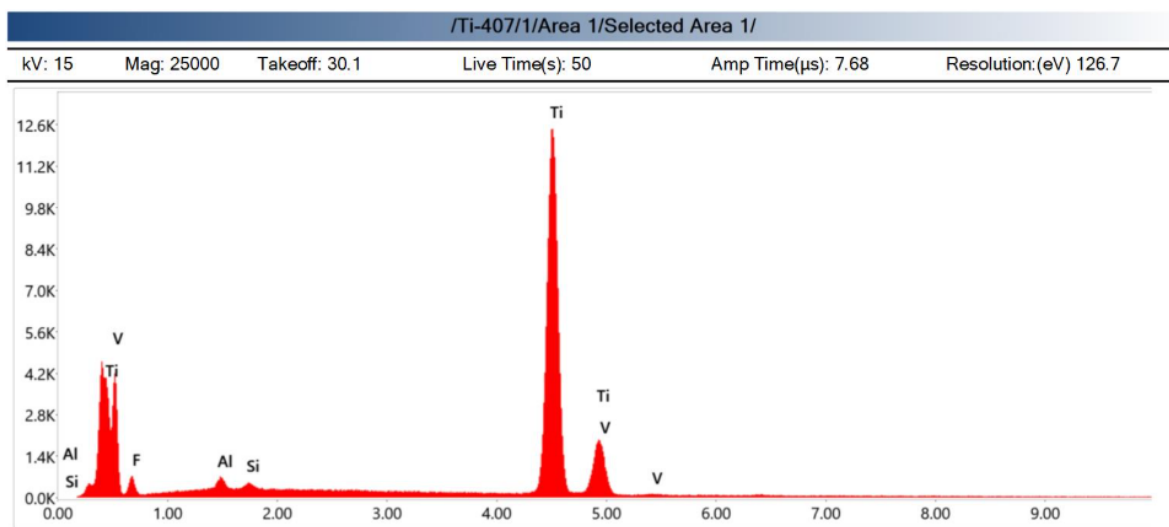


Figura 32. EDS de Ti-407.

La Tabla 7 resume la distribución elemental cuantificada por el análisis EDS. El titanio presenta el mayor % en peso (89.1%) y % atómico (80.3%), lo cual confirma su predominio superficial y la conservación de la matriz después del tratamiento. Los demás elementos se encuentran distribuidos en menor proporción, actuando como dopantes o remanentes funcionales. El flúor destaca con un 6.2% en peso y 14.1% atómico, lo que indica una incorporación significativa en la superficie. Esta alta proporción atómica sugiere que el flúor

no solo actúa como agente químico transitorio, sino que se integra estructuralmente a la capa anodizada, modificando su química y su energía superficial.

Tabla 7. Elementos medidos por medio de EDS en Ti-407.

Elemento	% peso	% atómico	% error
F	6.2	14.1	13.4
Al	1.5	2.5	8.9
Si	0.8	1.2	9.0
Ti	89.1	80.3	2.4
V	2.4	2.0	11.2

El aluminio (1.5% en peso; 2.5% atómico) y el vanadio (2.4% en peso; 2.0% atómico) provienen de la composición original de la aleación Ti-407. Aunque sus proporciones son bajas en comparación con el titanio, su presencia es relevante: ambos elementos pueden formar óxidos secundarios (Al_2O_3 y V_2O_5) que influyen en la estabilidad térmica, la resistencia mecánica y la separación de cargas electrónicas en procesos fotocatalíticos. La incorporación superficial de estos óxidos crea sitios activos heterogéneos que favorecen la transferencia electrónica y disminuyen la recombinación de pares electrón-hueco.

El silicio (0.8% en peso; 1.2% atómico) aparece en proporciones menores, probablemente residual del electrolito o de contaminación superficial. No obstante, su presencia sugiere trazas de SiO_2 en el recubrimiento, lo cual puede aportar rigidez superficial y efecto barrera, contribuyendo a la estabilidad del sistema nanotubular.

4. Espectroscopia RAMAN.

La caracterización estructural del material anodizado Ti-407 mediante espectroscopía Raman permitió analizar la naturaleza vibracional de la capa nanotubular y evaluar posibles diferencias entre regiones de la misma superficie. Las Figuras 33 y 34 muestran los espectros Raman obtenidos a una potencia de excitación de 10 mW en dos zonas distintas del material, representados con el método de corrección de línea base ALS. Este tratamiento es especialmente útil para muestras con morfología nanotubular, donde las variaciones topográficas pueden introducir ruido y distorsiones en la señal óptica.

En la Figura 33, correspondiente a la Zona 1, se observa un comportamiento ondulatorio pronunciado en casi todo el rango espectral ($0\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$). La señal presenta oscilaciones amplias, con máximos y mínimos bien definidos, lo que indica una respuesta vibracional compleja asociada a múltiples modos activos. Los picos principales aparecen distribuidos entre 200 y 1100 cm^{-1} , acompañados de fluctuaciones amplias hacia regiones superiores ($1500\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$), posiblemente relacionadas con vibraciones menos intensas o contribuciones armónicas. Esta distribución sugiere que, en esta zona, la superficie contiene una combinación heterogénea de enlaces Ti–O con diversas configuraciones cristalinas derivadas del proceso de anodización.

La intensidad diferencial en la Zona 1 también sugiere la presencia local de microtensiones o gradientes estructurales dentro del recubrimiento nanotubular. Dichas tensiones pueden originarse durante la formación electroquímica de los nanotubos, en especial cuando el diámetro de los poros y la densidad de estos varía en la escala micrométrica. El perfil Raman observado es consistente con la coexistencia de dominios con diferente grado de orden, lo cual es propio de aleaciones tratadas bajo condiciones complejas de oxidación.

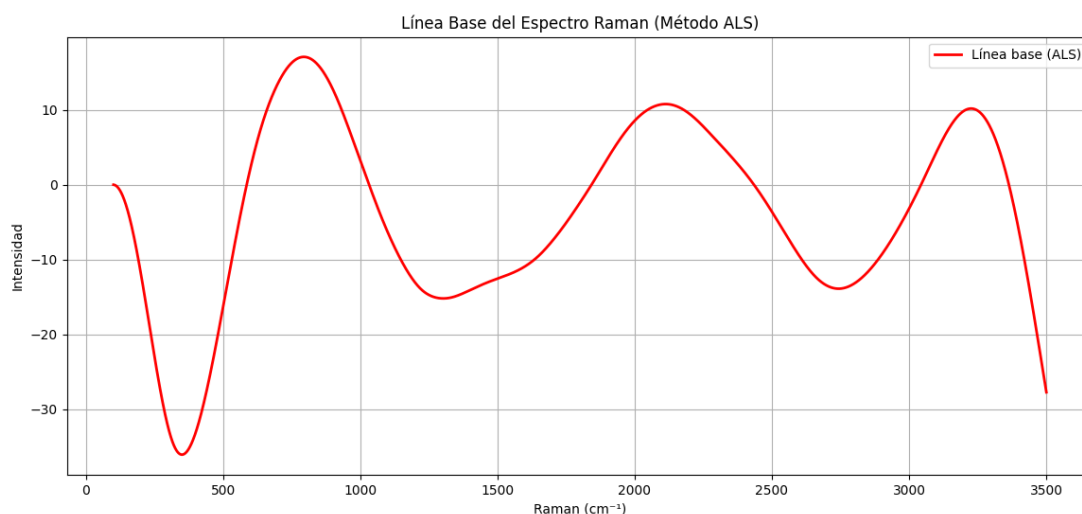


Figura 33. Espectroscopia Raman en Ti-407 a 10 mW en zona 1.

Por su parte, el espectro de la Figura 34 correspondiente a la Zona 2 muestra una respuesta vibracional notablemente más estable y con amplitud reducida. Las oscilaciones son menos pronunciadas en comparación con la Zona 1, y los cambios de intensidad se concentran

principalmente entre 200 y 1200 cm^{-1} . Esta reducción en amplitud sugiere que la capa nanotubular en esta región presenta una distribución más homogénea de enlaces Ti–O y menor concentración de defectos cristalinos. En este caso, la contribución vibracional parece corresponder a un arreglo estructural más ordenado, posiblemente relacionado con regiones en las que el crecimiento nanotubular fue más uniforme.

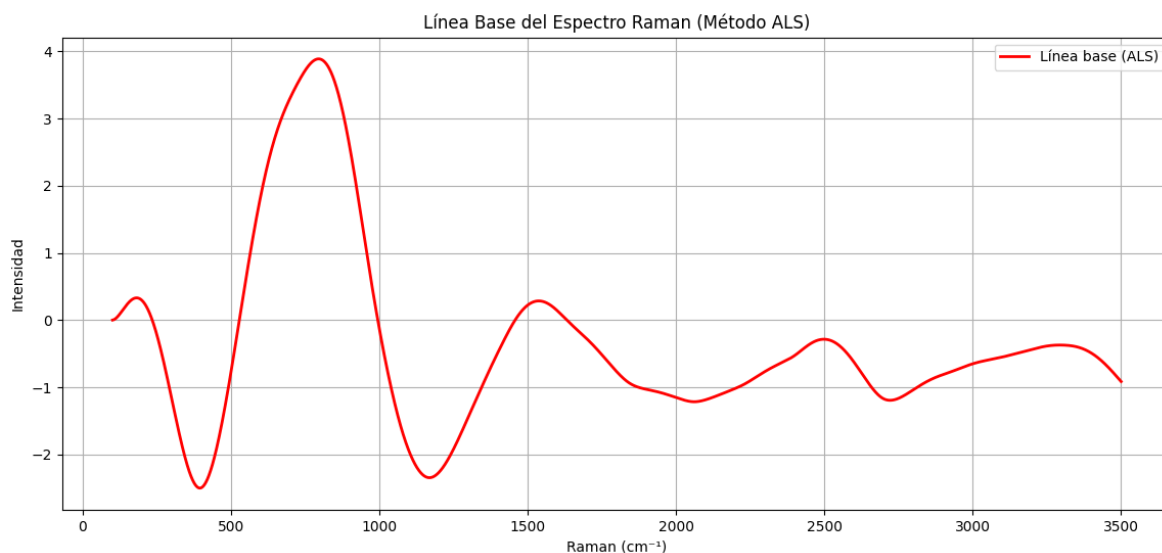


Figura 34. Espectroscopia Raman en Ti-407 a 10 mW en zona 2.

El contraste entre ambas zonas indica que el material no es completamente uniforme a nivel cristalino, a pesar de que la morfología observada por SEM se mantiene coherente. La mayor complejidad vibracional observada en la Zona 1 puede atribuirse a una concentración local de fases mixtas o a la presencia de residuos iónicos en la superficie. En cambio, la Zona 2 refleja un recubrimiento con organización molecular más continua, cuya respuesta Raman tiende a presentar oscilaciones suaves y claras sin superposiciones abruptas.

5. Espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos-x (XPS).

La espectroscopía XPS realizada sobre la superficie anodizada de Ti-407 permitió evaluar la composición química superficial y los estados de oxidación presentes en el recubrimiento nanotubular. En la Figura 35 se observa el espectro general de alta resolución, donde se

identifican picos correspondientes a los elementos constitutivos del material y los compuestos formados tras el proceso de anodización.

El pico más intenso del espectro se encuentra en la región correspondiente al **O 1s**, con una magnitud superior a 300,000 cuentas/segundo. Este resultado confirma la presencia dominante de oxígeno en la superficie, asociado directamente a la formación de óxidos metálicos durante el proceso de anodización. La intensidad elevada del pico indica no solo la formación de TiO_2 , sino además una superficie completamente oxidada y estable, lo cual coincide con la morfología nanotubular observada en SEM y el comportamiento fotocatalítico evidenciado posteriormente.

A energías inferiores (~ 450 eV), se distinguen picos correspondientes a los estados electrónicos del titanio. El Ti 2p2 y Ti 2s presentan intensidades bien definidas, lo que confirma que el titanio de la aleación se encuentra mayoritariamente en forma oxidada. La separación clara entre los estados Ti 2p1 y Ti 2p3 en la región de 900–1000 eV sugiere la presencia del estado químico Ti^{4+} , característico de TiO_2 . Esta doble separación es típica de óxidos cristalinos y demuestra que la superficie no contiene titanio metálico expuesto, sino una capa uniforme y completamente oxidada.

En la región de bajas energías (< 200 eV) se observan picos atribuibles a Al s1 y V s3, elementos propios de la aleación Ti-407. La detección superficial de aluminio y vanadio confirma que ambos elementos se integran parcialmente en la capa formada, posiblemente como óxidos secundarios (Al_2O_3 y V_2O_5). La presencia de estos óxidos tiene implicaciones relevantes: actúan como modificadores de energía superficial y pueden originar heterouniones con TiO_2 , favoreciendo la separación de cargas fotoinducidas y optimizando la respuesta fotocatalítica.

Otro componente relevante se identifica en la región de ~ 800 – 900 eV, donde aparece el pico correspondiente a F 1s. Al igual que en el análisis EDS, la presencia de flúor es consecuencia directa del electrolito utilizado en la anodización. Este elemento juega un papel fundamental en el crecimiento nanotubular, ya que favorece la disolución local del óxido y permite la autoorganización de cavidades cilíndricas. La incorporación superficial del flúor después del

anodizado indica que no actúa como un agente transitorio, sino que permanece parcialmente ligado químicamente al TiO_2 , generando complejos Ti-F que modifican la energía superficial y la interacción con especies adsorbidas.

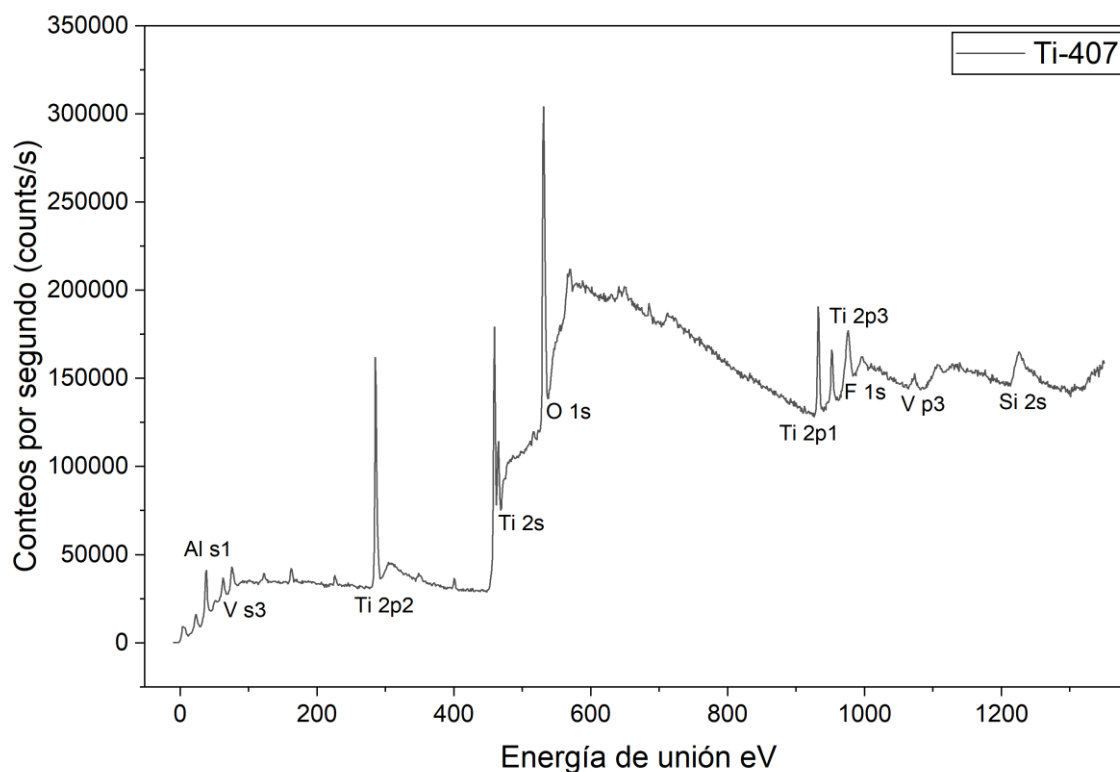


Figura 35. XPS en Ti-407.

Finalmente, el pico asociado a Si 2s en la región superior del espectro sugiere la presencia de silicio residual en la superficie. Si bien su intensidad es menor, su detección confirma la posible formación de capas submicrométricas o contaminantes que, aun en bajas concentraciones, pueden influir en la estabilidad mecánica o química del recubrimiento. Este tipo de presencia superficial no altera negativamente la funcionalidad, pero debe considerarse en aplicaciones biomédicas donde la pureza química es un factor crítico.

6. Espectroscopia UV-Vis.

En la Figura 36 se muestra el espectro UV-Vis transformado mediante la función de Kubelka–Munk, representado como $[F(R_\infty)h\nu]^{1/2}$ en función de la energía fotónica. El comportamiento inicial del espectro presenta una región de absorción relativamente suave, típica de materiales con estructura porosa o nanotubular en donde existen estados electrónicos superficiales que suavizan el borde de absorción.

En primera instancia, fueron analizadas dos muestras de la aleación Ti-407 después del proceso de formación de los nanotubos. La extrapolación lineal de la región de mayor pendiente hacia el eje de energía en la figura 36 A y B, permite determinar el valor del band gap indirecto, obteniéndose 2.64 y 2.54 eV respectivamente. Estos valores se encuentran por debajo del band gap teórico del TiO_2 anatasa (3.2 eV), lo cual puede atribuirse a la presencia de defectos estructurales, oxígenos vacantes o impurezas asociadas al proceso de anodizado, que inducen niveles energéticos dentro de la banda prohibida y reducen la energía necesaria para la transición electrónica. Esta reducción de la banda prohibida resulta favorable para aplicaciones fotocatalíticas, ya que desplaza la absorción hacia la región visible del espectro electromagnético. No obstante, debido a que resulta una reducción significativa, otras dos muestras fueron preparadas mediante el mismo proceso electroquímico, para promover el crecimiento de la capa de óxidos y poder de esta manera, comprobar que esta reducción en la banda prohibida es consistente en este óxido de la aleación Ti-407.

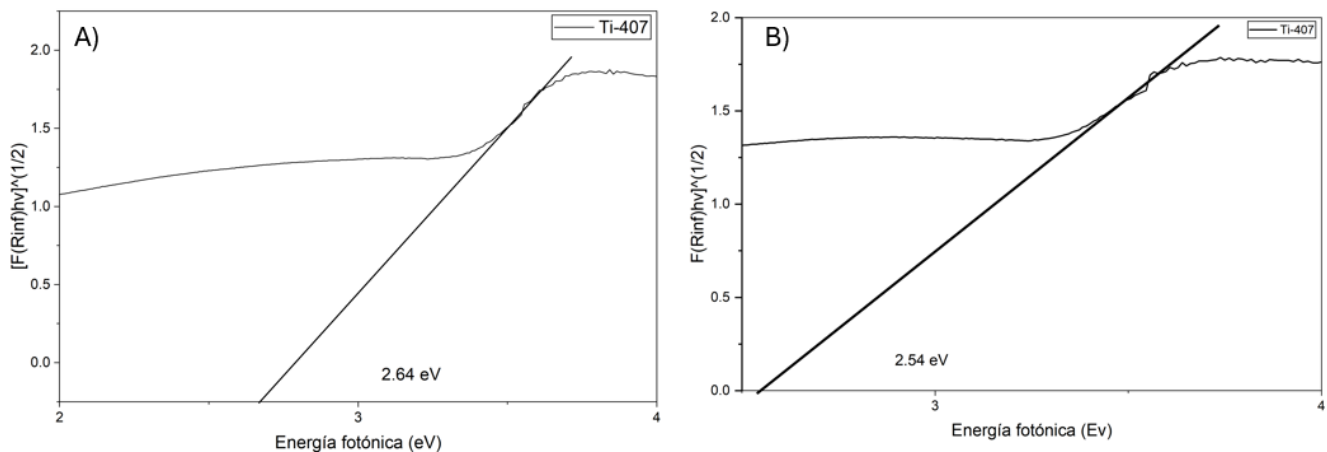


Figura 36. Espectroscopia UV-VIS A) muestra 1 B) muestra 2.

En la Figura 37 A y B se muestran los resultados de estas otras dos muestras procesadas. La línea recta ajustada a la zona lineal del espectro evidencia una intersección en la Figura 37 A y B, ingtersectan en un valor de 2.68 eV en ambas. Lo anterior indica que esta reducciión en la banda prohibida se encontró en las cuatro muestras, lo que hace consistente este resultado.

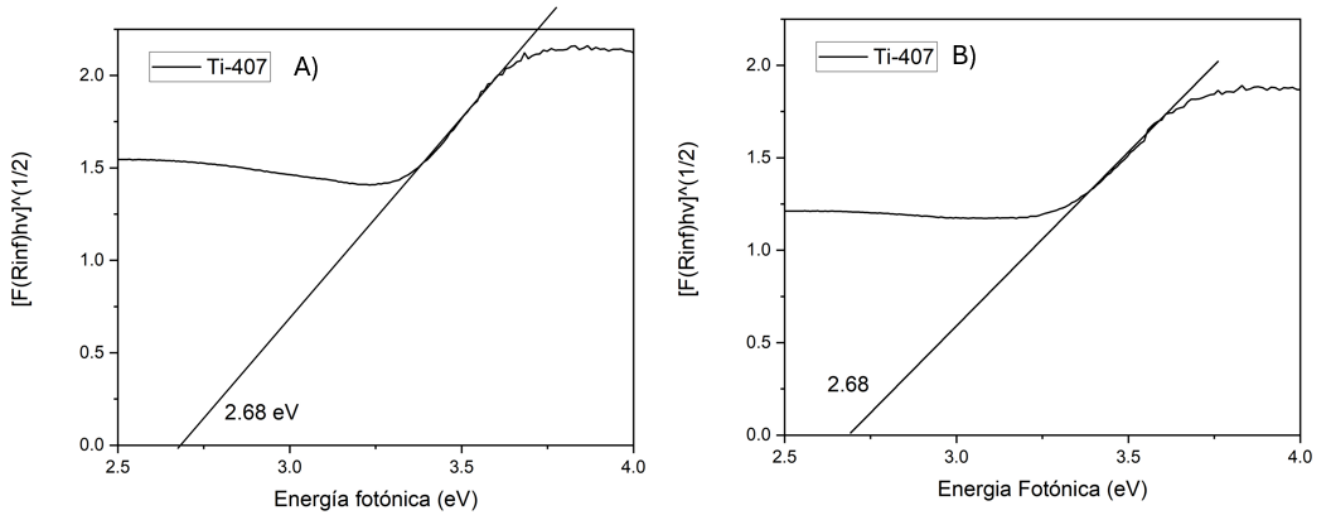


Figura 37. Espectroscopia UV-Vis A) muestra 3 B) muestra 4.

7. Difracción de rayos-x.

El difractograma (Figura 38) correspondiente a la muestra de Ti-407 sin anodizar presenta picos de alta intensidad asociados principalmente a la fase α del titanio, la cual cristaliza en una estructura hexagonal compacta (HCP). Los máximos más intensos se localizan alrededor de $2\theta \approx 35^\circ, 38^\circ, 40^\circ, 53^\circ, 63^\circ$ y 70° , los cuales pueden atribuirse a los planos cristalinos característicos del titanio alfa, tales como (100), (002), (101), (102), (110) y (103). La elevada intensidad y nitidez de estos picos indica una alta cristalinidad del sustrato metálico y un tamaño de grano relativamente grande.

Adicionalmente, se observa la presencia de picos de menor intensidad asociados a la fase β del titanio, de estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), identificables principalmente por reflexiones cercanas a $2\theta \approx 39^\circ$ y 56° , correspondientes a los planos (110) y (200). Esta

coexistencia de fases α y β es consistente con la composición de la aleación Ti-407, en la cual los elementos aleantes estabilizan parcialmente la fase beta. Asimismo, se detectan señales débiles atribuibles a óxidos de titanio, particularmente anatasa (A) y rutilo (R), evidenciadas por picos de baja intensidad alrededor de $2\theta \approx 25^\circ$ (anatasa, plano (101)) y $2\theta \approx 27^\circ$ (rutilo, plano (110)). Estas fases se asocian a la formación espontánea de una capa pasiva de TiO_2 sobre la superficie del material expuesto al ambiente.

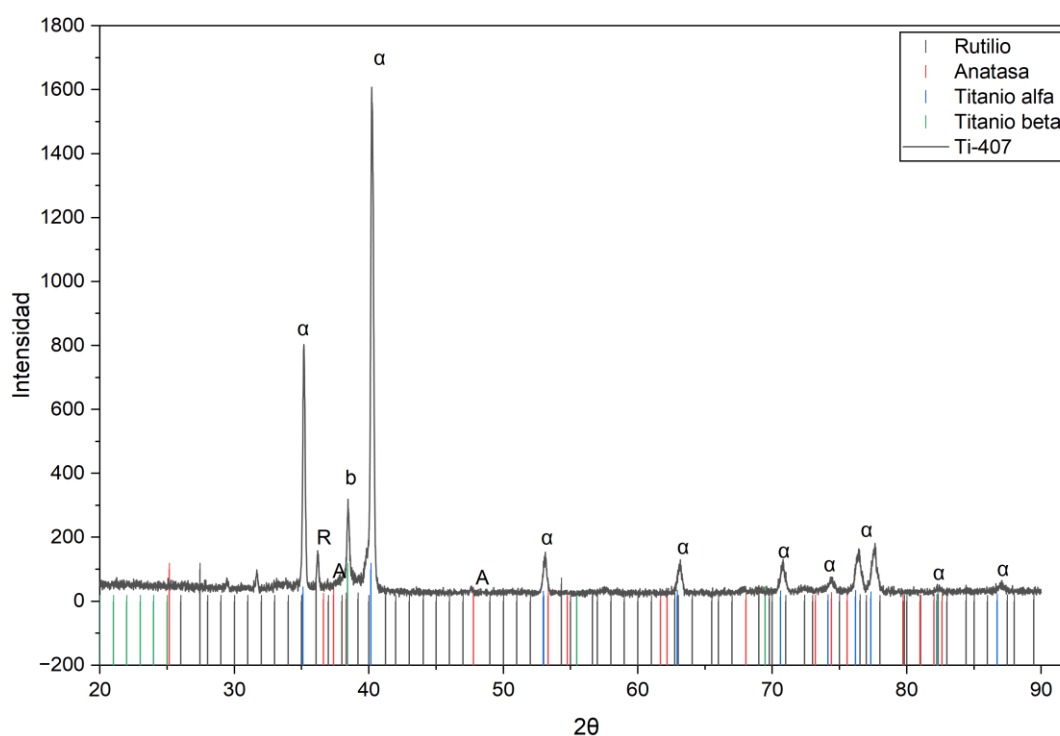


Figura 38. Espectroscopia UV-Vis en Ti-407 decapado.

El difractograma (Figura 39) correspondiente a la muestra de Ti-407 con nanotubos muestra una modificación en la intensidad relativa de los picos respecto al material no anodizado. La fase α del titanio continúa siendo dominante, conservando sus principales reflexiones cristalográficas, especialmente las asociadas a los planos (002) y (101), lo que indica que el proceso de anodizado no altera la estructura cristalina del sustrato metálico. Sin embargo, se observa un incremento en la presencia de fases de TiO_2 , particularmente anatasa y rutilo, lo cual es característico de superficies anodizadas. El pico de anatasa en $2\theta \approx 25.3^\circ$, correspondiente al plano (101), se vuelve más evidente, lo que sugiere la formación

preferencial de esta fase durante el crecimiento electroquímico de los nanotubos. La fase anatasa es típicamente asociada con estructuras nanotubulares amorfas o semicristalinas que pueden cristalizar parcialmente durante el anodizado.

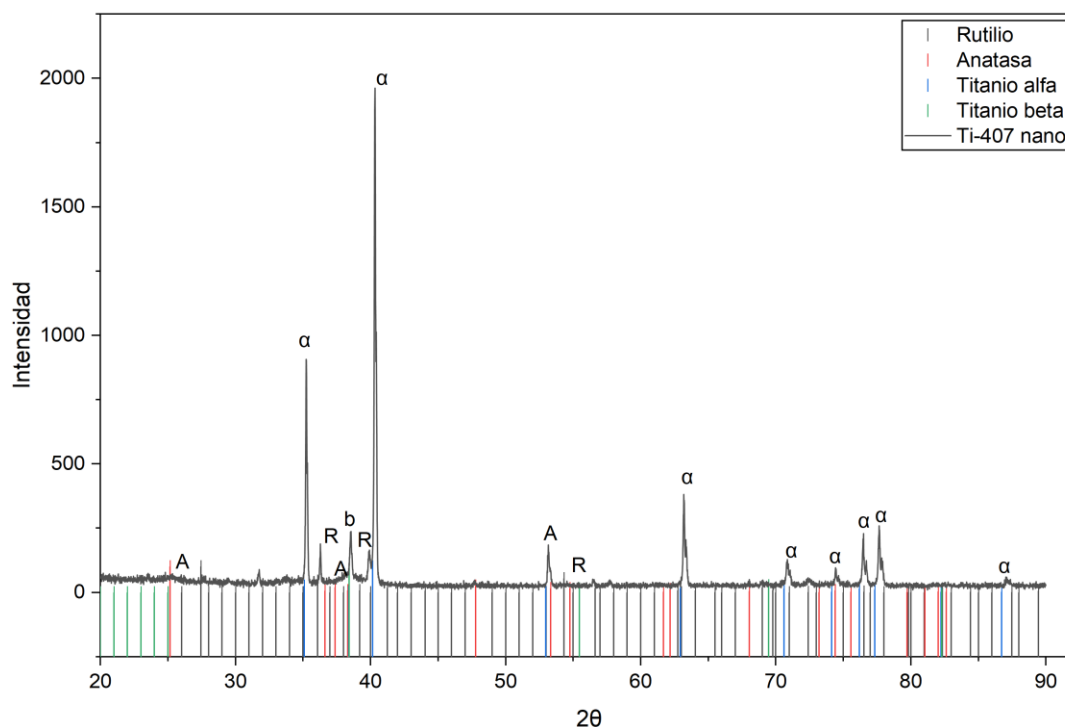


Figura 39. Espectroscopia UV-Vis Ti-407 con nanotubos.

La fase rutilo, identificada por el pico en $2\theta \approx 27.4^\circ$ (110), aparece con menor intensidad, lo que indica que su formación es limitada en ausencia de un tratamiento térmico posterior. La coexistencia de anatasa y rutilo refleja una capa de óxido heterogénea, con regiones de diferente orden cristalino.

El difractograma (Figura 40) de la muestra de Ti-407 sometida a tratamiento térmico a 450°C durante 2 horas evidencia cambios significativos en la cristalinidad de las fases de TiO_2 . En este caso, se observa un incremento notable en la intensidad y definición de los picos correspondientes a anatasa y rutilo, indicando un proceso de cristalización inducido térmicamente. El pico de anatasa en $2\theta \approx 25.3^\circ$, correspondiente al plano (101), se intensifica

considerablemente, lo que confirma la transformación del óxido inicialmente amorfo o pobremente cristalino hacia una fase anatasa bien definida. Asimismo, los picos asociados a rutilo, particularmente el plano (110) en $2\theta \approx 27.4^\circ$, se vuelven más evidentes, sugiriendo el inicio de una transformación parcial de anatasa a rutilo, fenómeno típico en TiO_2 tratado térmicamente en este rango de temperatura. Los picos correspondientes a la fase α del titanio permanecen presentes y bien definidos, indicando que el tratamiento térmico no provoca cambios estructurales significativos en el sustrato metálico.

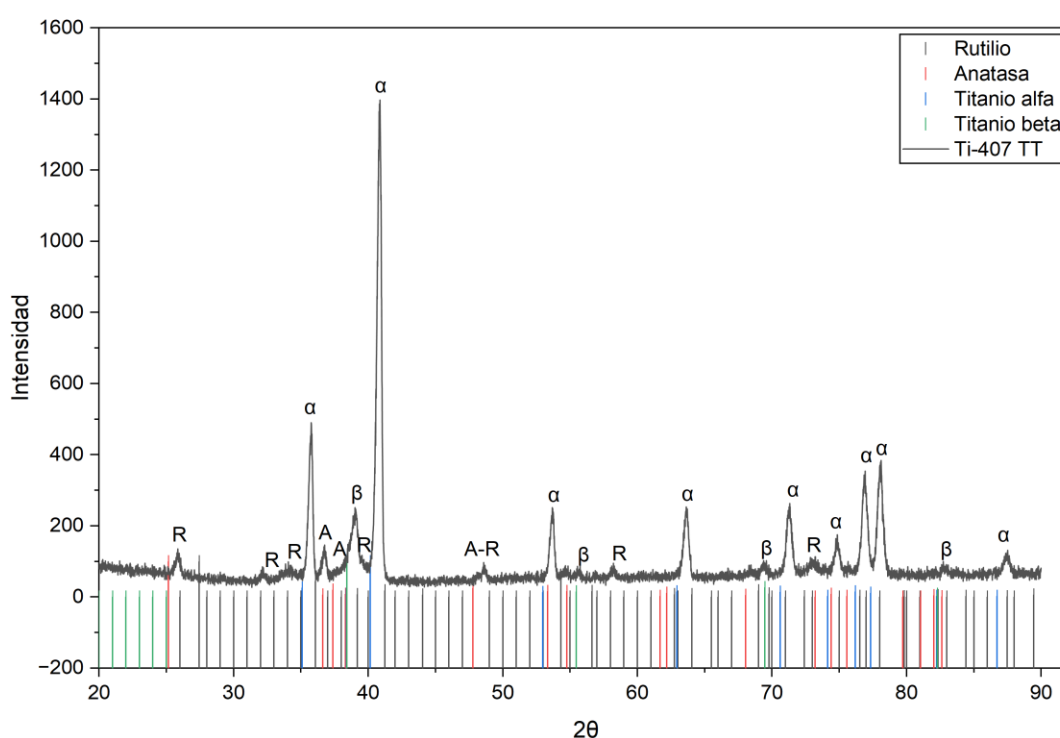


Figura 40. Espectroscopia UV-VIS Ti-407 con tratamiento térmico.

8. Condiciones experimentales de fotocatalisis en bacterias.

Cada muestra de Ti-407 sin el tratamiento térmico, fue expuesta a diferentes condiciones de tratamiento:

- **NA – UV:** superficie sin anodizar y sin radiación UV (control negativo).
- **NA + UV:** superficie sin anodizar, pero irradiada con UV.

- **A – UV:** superficie anodizada sin exposición a UV (solo efecto del anodizado).
- **A + UV:** superficie anodizada y sometida a radiación ultravioleta (proceso fotocatalítico completo).

Como control positivo se utilizó el inóculo bacteriano estandarizado según la **escala de McFarland** (26×10^6 UFC/mL), que representa el crecimiento normal esperado sin ningún tratamiento.

Después del contacto con las muestras, los cultivos fueron recuperados, diluidos y sembrados en cajas Petri con agar nutritivo. Las placas se incubaron a 37 °C durante 16 horas, permitiendo cuantificar el número de unidades formadoras de colonias (UFC) como indicador del crecimiento bacteriano.

8.1 Resultados *E.coli*.

La Figura 41 muestra la cuantificación de las unidades formadoras de colonias (UFC/mL) de *Escherichia coli* tras la exposición a diferentes tratamientos superficiales del Ti-407, evaluando el efecto del anodizado, la presencia de nanotubos y la irradiación con luz ultravioleta. El control bacteriano presenta el valor más alto de UFC/mL, con aproximadamente 91 UFC/mL, lo que confirma un crecimiento bacteriano sin inhibición en ausencia de tratamiento. En contraste, las muestras sometidas a tratamientos combinados muestran una reducción progresiva en la concentración bacteriana. La muestra T1 NA + UV exhibe una disminución significativa de UFC/mL hasta 77.66, evidenciando un efecto bactericida moderado asociado a la interacción entre la superficie del material y la radiación UV. Por su parte, la muestra T2 NA + UV presenta una reducción más pronunciada, alcanzando 63 UFC/mL, lo que sugiere una mayor actividad antimicrobiana relacionada con las modificaciones superficiales inducidas.

La muestra T3 A – UV indicando que el anodizado por sí solo contribuye de manera relevante a la inhibición bacteriana, incluso en ausencia de radiación UV. Finalmente, la muestra T4 A + UV presenta el menor número de UFC/mL, con 51.33×10^3 , lo que confirma un efecto sinérgico entre la estructura nanotubular y la irradiación UV, favoreciendo la generación de especies reactivas de oxígeno responsables del daño celular bacteriano. Estos resultados

demuestran que las superficies de Ti-407 modificadas mediante anodizado y activadas por radiación UV presentan un comportamiento antimicrobiano superior frente a *E. coli*.

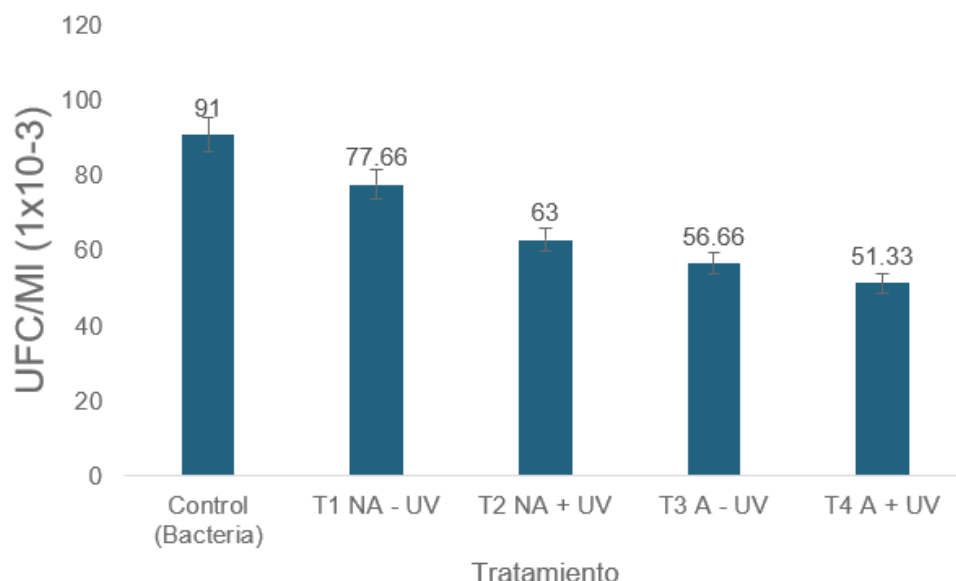


Figura 41. Unidades formadoras de colonias en Ti-407 para *E. coli*.

La Tabla 8 resume el porcentaje de inhibición bacteriana calculado a partir de los valores de UFC/mL obtenidos para cada tratamiento, tomando como referencia el control bacteriano, al cual se asigna un 0 % de inhibición. El tratamiento T1 NA – UV presenta el menor porcentaje de inhibición (22.34 %), lo que sugiere un efecto limitado del material sin modificaciones superficiales ni activación fotocatalítica. En conjunto, estos resultados confirman que la modificación superficial del Ti-407 y la irradiación UV juegan un papel clave en la inhibición del crecimiento de *E. coli*. En comparación, T2 NA + UV muestra una inhibición del 37 %, evidenciando que la radiación UV por sí sola también tiene un efecto bactericida, aunque menos eficiente que cuando se combina con superficies anodizadas.

El tratamiento T3 A – UV presenta una inhibición del 43.34 %, indicando que el anodizado contribuye de forma notable a la reducción bacteriana aun sin activación UV, posiblemente debido a cambios en la topografía superficial y a la interacción física con la membrana bacteriana.

Los resultados muestran una clara dependencia del efecto antimicrobiano con el tipo de tratamiento superficial aplicado al Ti-407. El tratamiento T4 A + UV alcanza el mayor porcentaje de inhibición, con un valor de 48.67 %, lo que confirma que la combinación del anodizado y la irradiación UV potencia significativamente la actividad bactericida del material. Este comportamiento se asocia a la activación fotocatalítica del TiO₂ presente en la superficie, favoreciendo la generación de radicales hidroxilo y especies reactivas de oxígeno.

Tabla 8. Porcentaje de inhibición en Ti-407 para E.coli.

TRATAMIENTO	% DE INHIBICIÓN
Control (bacteria)	0
T1 NA – UV	22
T2 NA + UV	37
T3 A – UV	44
T4 A + UV	49

La Figura 42 presenta una evaluación cualitativa del crecimiento de *E. coli* mediante imágenes de placas de cultivo, complementando los resultados cuantitativos obtenidos en las figuras y tablas anteriores. En el control bacteriano se observa una alta densidad de colonias distribuidas de manera uniforme sobre la superficie de agar, lo que confirma un crecimiento bacteriano sin restricción. En las muestras correspondientes a **NA – UV**, se aprecia una ligera reducción en el número de colonias, coherente con el bajo porcentaje de inhibición calculado. En contraste, las muestras **A – UV** muestran una disminución más evidente en la densidad de colonias, lo que respalda el efecto antimicrobiano asociado al anodizado del Ti-407.

Las imágenes correspondientes a **A + UV** muestran la menor cantidad de colonias visibles, así como zonas claras con ausencia de crecimiento bacteriano, lo que indica una inhibición significativa. Este comportamiento visual confirma el efecto sinérgico entre la estructura

nanotubular del Ti-407 y la irradiación UV, reforzando la hipótesis de un mecanismo fotocatalítico responsable de la inactivación bacteriana.

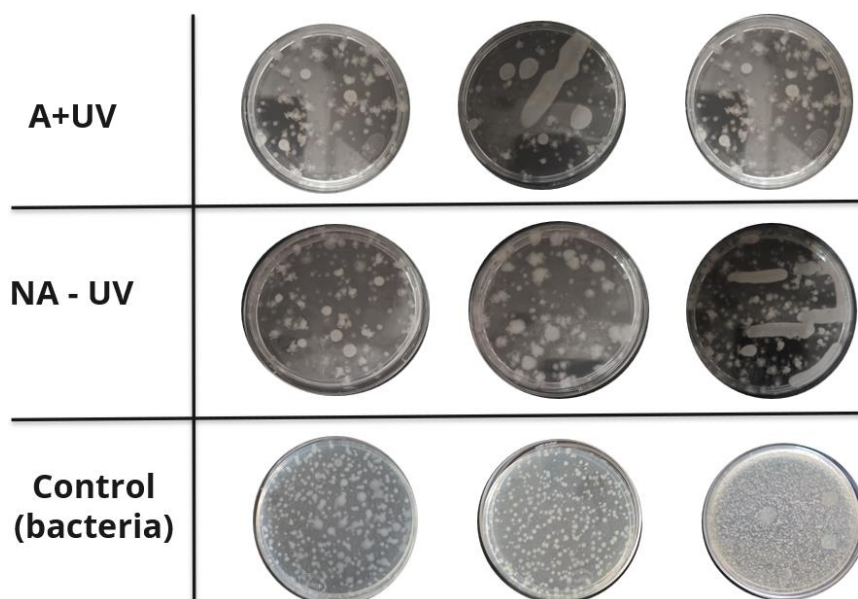


Figura 42. Representación visual en Ti-407 para *E. coli*.

8.2 Resultados en *P. aeruginosa*.

La Figura 43 muestra la cuantificación de las unidades formadoras de colonias (UFC $\times 10^3$) de *Pseudomonas aeruginosa* tras los distintos tratamientos aplicados a la aleación Ti-407, comparados con el control bacteriano. El control presenta el mayor número de UFC, confirmando un crecimiento bacteriano sin inhibición. En contraste, todos los tratamientos exhiben una reducción progresiva en el número de colonias, lo que evidencia un efecto antimicrobiano del material bajo las condiciones evaluadas.

Los tratamientos que combinan anodizado y radiación UV muestran una disminución más marcada en las UFC, particularmente en T4 A + UV, donde se observa la menor carga bacteriana. Esto sugiere que la activación fotocatalítica del TiO_2 formado sobre la superficie del Ti-407 potencia la generación de especies reactivas de oxígeno, responsables del daño celular bacteriano. Por otro lado, los tratamientos sin radiación UV presentan una reducción

menos pronunciada, indicando que, aunque la nanotubos contribuyen a la inhibición bacteriana, la radiación UV juega un papel clave en la maximización del efecto antimicrobiano frente a *P. aeruginosa*. (Sunada, 2003)

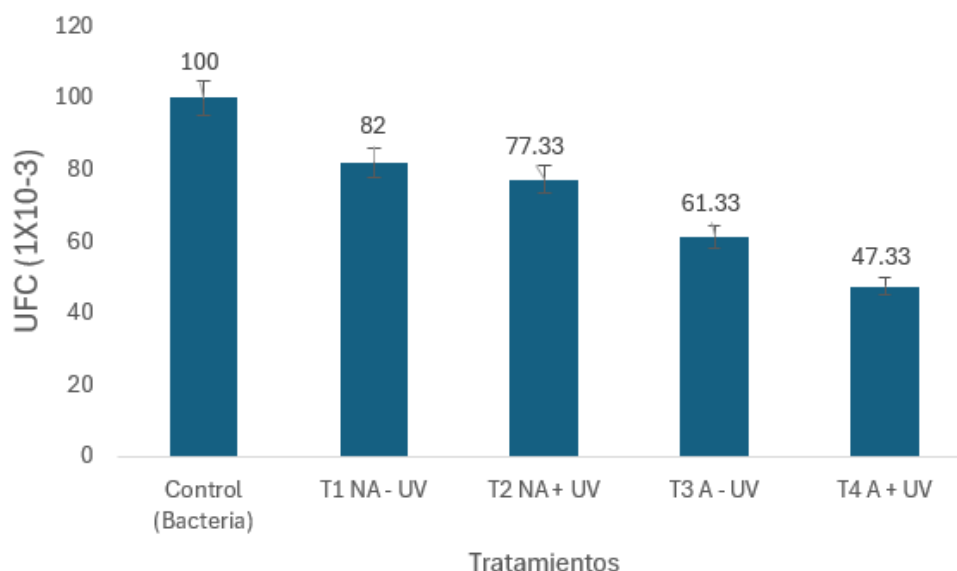


Figura 43. Unidades formadoras de colonias en Ti-407 para *P. aeruginosa*.

La Tabla 9 resume el porcentaje de inhibición bacteriana obtenido para cada tratamiento aplicado al Ti-407, tomando como referencia el control bacteriano, el cual no presenta inhibición. Los tratamientos sin anodizado o sin radiación UV presentan valores de inhibición menores, como es el caso de T2 NA + UV (22.67%) y T1 NA – UV (18%). Estos resultados evidencian que la presencia de la capa de TiO₂ nanotubular y su activación fotocatalítica son factores determinantes en la reducción del crecimiento de *P. aeruginosa*. Asimismo, los valores intermedios observados en T3 A – UV sugieren que la modificación superficial por sí sola contribuye parcialmente al efecto antimicrobiano, aunque no de manera tan eficiente como cuando se combina con radiación UV. Los resultados muestran que el tratamiento T4 A + UV alcanza el mayor porcentaje de inhibición (52.67%), confirmando la alta eficiencia del proceso de anodizado combinado con radiación ultravioleta.

Tabla 9. Porcentaje de inhibición en Ti-407 para *P. aeruginosa*

TRATAMIENTO	% DE INHIBICIÓN
Control (bacteria)	0
T1 NA - UV	18
T2 NA + UV	23
T3 A - UV	39
T4 A + UV	53

En la Figura 44 se muestra el crecimiento bacteriano de *Escherichia coli* cultivada sobre la superficie del material Ti-407, evaluado bajo tres condiciones experimentales distintas, dispuestas en filas horizontales. Cada condición cuenta con triplicado, lo que permite observar la reproducibilidad del efecto. El control (bacteria) que corresponde al control positivo, donde *E. coli* crece sin Ti-407 ni tratamientos adicionales. Aquí se aprecia un crecimiento bacteriano muy denso, casi continuo, con un aspecto turbio característico de una proliferación sin restricciones. Esta condición confirma la viabilidad del cultivo bacteriano y sirve como referencia para comparar los efectos observados en las condiciones experimentales. En la condición NA – UV que corresponde a *E. coli* sobre Ti-407 sin activación y sin exposición a radiación UV. En estas placas se observa un crecimiento bacteriano más abundante y uniforme, con una alta concentración de colonias bien definidas y de diferentes tamaños. La distribución homogénea sugiere que, en ausencia del tratamiento UV, el material Ti-407 no presenta un efecto bactericida significativo, permitiendo la proliferación normal de *E. coli*.

Por consiguiente, en el caso de la condición A + UV se observa *E. coli* en Ti-407 sometido a la combinación de anodizado (A) y radiación ultravioleta (UV). Las placas presentan colonias bacterianas visibles, distribuidas de forma heterogénea sobre la superficie del agar. Sin embargo, comparado con el control, se aprecia una disminución en la densidad bacteriana total, así como colonias de tamaño irregular, lo que sugiere un efecto inhibitorio parcial del

tratamiento. La presencia de espacios con menor crecimiento indica que la radiación UV, junto con la activación del material, afecta la viabilidad bacteriana, aunque no logra una inhibición completa.

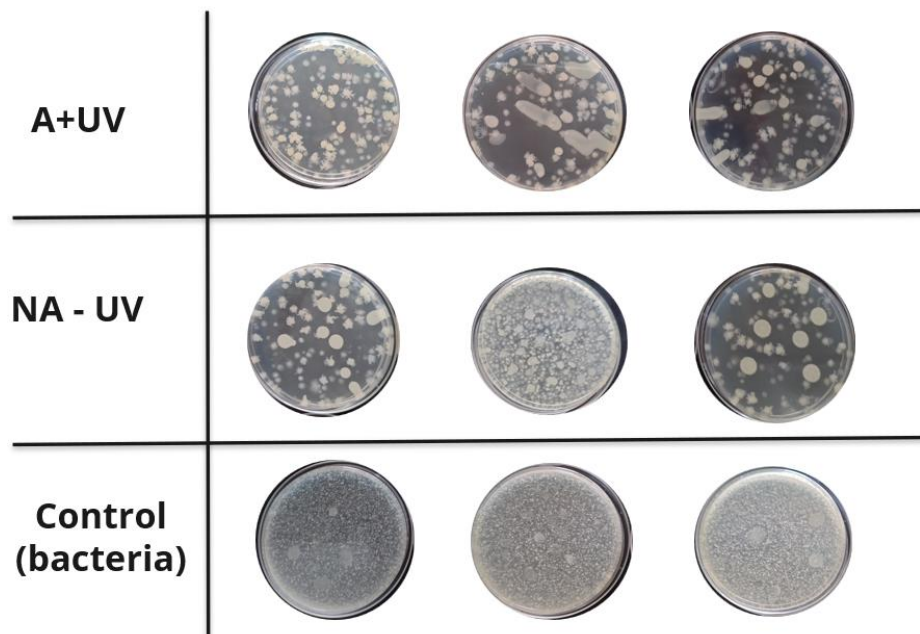


Figura 44. Representación visual de Ti-407 para *P. aeruginosa*.

PARTE 3.

Síntesis de resultados

1. Comparativo entre los resultados del Ti puro y la aleación Ti-407.

En este trabajo se hizo evidente que las muestras anodizadas de titanio puro y de la aleación Ti-407 presentaron diferencias relevantes en la actividad fotocatalítica. Pero estas diferencias podrían deberse a distintos factores por lo que para poder analizar esto, se debe realizar un comparativo de distintas características y en la Tabla 9 se presentan algunas de éstas:

- las fases de originales presentes en la microestructura del material antes del proceso electroquímico
- las fases encontradas los óxidos de los nanotubos después del proceso electroquímico
- los elementos presentes en los óxidos de los nanotubos
- la energía de banda prohibida (E_g) de los óxidos
- y el incremento estimado en el área debido a la formación de los nanotubos.

Tabla 10. Comparacion de los dos tipos de aleaciones.

MATERIAL	FASES DE ORIGEN	FASES EN ÓXIDOS NANOTUBULA RES	ELEMENTOS EN ÓXIDOS NANOTUBULARES	EG (EV)	INCREMENTO ESTIMADO EN ÁREA
TI	A	A + R	O, Ti y F	3.20	~55.0
TI-407	$\alpha + \beta$	A + R	O, Ti, F, Al, V y Si	2.68	~250

Por otro lado, en la tabla 10 se concentran resultados de inhibición hacia las bacterias, de los óxidos desarrollados sin y con el efecto de la luz UV para los dos materiales y bacterias estudiadas.

Tabla 11. Porcentajes de inhibición de los óxidos (Anodizados) en bacterias sin y con UV.

BACTERIA	NANOTUBOS DE TI	NANOTUBOS DE TI-407	NANOTUBOS DE TI	NANOTUBOS DE TI-407
	T3 A – UV	T3 A - UV	T4 A + UV	T4 A + UV
<i>E. COLI</i>	29 %	43 %	39 %	49 %
<i>P. AERUGINOSA</i>	29 %	39 %	46 %	53 %

De esta tabla 11 se puede observar que es claro que las superficies anodizadas por sí solas, todas presentan una inhibición intrínseca a las bacterias, pero al irradiar con UV las superficies anodizadas con nanotubos, también en todos los casos se incrementan los porcentajes de inhibición, lo que indica que un proceso fotocatalítico se activa, favoreciendo así la eliminación de las bacterias. Por otra parte, la *E. coli* resulta ser más resistente que la *P. aeruginosa* en las distintas situaciones antes presentadas.

Al realizar un análisis comparativo entre los óxidos de ambos materiales, la inhibición intrínseca de los nanotubos del Ti-407, es decir sin irradiación de luz UV, resulta mayor que para los nanotubos obtenidos del Ti puro, lo que de acuerdo a las diferencias de la tabla 9, podría ser atribuido directamente al incremento estimado del área a la que son expuestas las bacterias, ya que los elementos extra encontrados (Al, V y Si) sugieren tener una tendencia a la biocompatibilidad y el E_g , solo actúa al irradiar la superficies con luz.

Por otro lado, para encontrar el efecto del proceso fotocatalítico, se tiene que calcular la diferencia entre el incremento del porcentaje de inhibición del estado con y sin luz UV ($\Delta\% \text{ inhibición} = \% \text{ inhibiciónT4} - \% \text{ inhibiciónT3}$) para cada tipo de óxido. Y al hacer esto se obtienen los valores de la tabla 11. De estos resultados se puede observar cómo la *E. coli* sigue siendo la más resistente incluso bajo el efecto fotocatalítico al igual como al efecto intrínseco del óxido mencionado anteriormente. Pero también resulta evidente que los nanotubos obtenidos del Ti puro, presentan un mayor efecto fotocatalítico que los de Ti-407, que pudiera derivarse de los cambios en su E_g . Por último, de acuerdo con estos resultados,

el efecto combinado intrínseco y de fotocátalisis hace al óxido del Ti-407 más activo para la inhibición bacterial que el óxido generado a partir del Ti puro.

Tabla 12. Diferencias entre el incremento del porcentaje de inhibición del estado con y sin luz UV.

BACTERIA	NANOTUBOS DE TI	NANOTUBOS DE TI-407
	$\Delta\% = \%T4 - \%T3$	$\Delta\% = \%T4 - \%T3$
<i>E. COLI</i>	10 %	6 %
<i>P. AERUGINOSA</i>	17 %	14 %

CAPITULO 5. CONCLUSIONES.

Fue posible obtener de manera exitosa superficies nanoestructuradas mediante el proceso de anodizado electroquímico empleando la aleación Ti-407, las cuales, tras su caracterización, evidenciaron diferencias significativas en comparación con las superficies nanoestructuradas obtenidas a partir de titanio puro. Dichas diferencias se manifestaron principalmente en la composición química del óxido formado, así como en la microestructura y la morfología superficial de los nanotubos, lo que confirma que la composición del sustrato influye directamente en las propiedades finales del recubrimiento anodizado.

El óxido de los nanotubos formados sobre la aleación Ti-407 presentó la incorporación de elementos como Al, Si y V, además de los elementos característicos del Ti puro. La presencia de estos elementos, comúnmente asociados con mejoras en la biocompatibilidad y modificaciones en las propiedades electrónicas del material, contribuyó a un comportamiento optoelectrónico distinto. En particular, se observó una disminución notable en la energía de banda prohibida (E_g), alcanzando un valor de 2.7 eV, en contraste con los 3.2 eV obtenidos para el óxido de Ti puro. Asimismo, la estimación del área de contacto entre las superficies nanoestructuradas y las bacterias indicó un incremento aproximado de cinco veces en el caso de la aleación, lo que sugiere una mayor interacción superficie-microorganismo.

Ambas superficies nanotubulares mostraron una inhibición bacteriana intrínseca frente a *E. coli* y *P. aeruginosa*, además de presentar actividad fotocatalítica bajo irradiación. No obstante, el óxido de la aleación Ti-407 exhibió una mayor actividad bactericida total, tanto por efecto intrínseco como por la combinación con la fotocatalisis. Este comportamiento puede atribuirse principalmente al aumento en el área superficial expuesta y a la modificación de la composición química del óxido. En contraste, el óxido de Ti puro presentó una mayor contribución fotocatalítica, lo cual puede estar relacionado con sus propiedades optoelectrónicas y su mayor valor de E_g . Adicionalmente, se identificó que *E. coli* mostró una mayor resistencia frente a ambos mecanismos de inhibición en comparación con *P. aeruginosa*, lo que sugiere una respuesta bacteriana dependiente del tipo de microorganismo.

Finalmente, las variaciones fisicoquímicas inducidas por el uso de la aleación Ti-407 como sustrato para la formación de nanotubos de óxido generaron cambios relevantes en la

actividad fotocatalítica y bactericida del material. En conjunto, estos resultados demuestran que los nanotubos obtenidos a partir de la aleación Ti-407 presentan un desempeño superior frente a los formados sobre Ti puro, posicionándolos como una alternativa prometedora para aplicaciones donde se requieran superficies con propiedades antimicrobianas mejoradas.

Referencias

(2016). Obtenido de Guia lab: <https://www.guialab.com.ar/notas-tecnicas/como-debe-ser-el-espectrometro-raman-actual/>

- ALBERTO MAIMONE, S. C. (2014). CARACTERIZACIÓN DEL ÓXIDO DE TITANIO OBTENIDO MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO Y ANODIZADO ELECTROQUÍMICO. *Revista de la Facultad de Ingeniería*. DOI:
- Aniket Balapure, J. R. (2023). Recent advances in semiconductor heterojunctions: a detailed review of the fundamentals of photocatalysis, charge transfer mechanism and materials. *Royal Society of chemistry*, 43-69. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3lf00126a>
- ANZURES, F. E. (2023). *BIOCOMPATIBILIDAD DE NANOESTRUCTURAS FORMADAS POR ANODIZADO EN ALEACIONES DE BASE TITANIO PARA APLICACIONES BIOMÉDICAS* .
- BORGES, M., ALVAREZ, M., ESPARZA, P., MEDINA, E., MARTÍN, P., & FIERRO, J. (2008). Ti- containing volcanic ash as photocatalyst for degradation of phenol. *Energy and Environmental Science*, 364-369. DOI: <https://doi.org/10.1039/B802187M>
- C. Veiga, J. D. (2012). PROPERTIES AND APPLICATIONS OF TITANIUM ALLOYS. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 133-148.
- Castro, S. (8 de Julio de 2025). *Análisis de bacterias patógenas en México revela amenazas emergentes para la salud pública*. Obtenido de QCVLab: <https://qcvlab.com/analisis-bacterias-patogenas-mexico-revela-amenazas-emergentes-salud-publica/>
- Centro de Investigación en Materiales Avanzados. (s.f.). Obtenido de CIMAV: <https://cimav.edu.mx/laboratorios/mty-microscopia-electronica-de-barrido>
- Chatterjee P, B. (2024). Study finds hospital surfaces can harbor harmful microbes even after routine disinfection. *American Journal of Infection Control* , 220-224. DOI: 10.1016/j.ajic.2023.11.006
- D. Rodríguez, P. S. (2010). Anodización del titanio para la mejora ante la degradación química de material quirúrgico. *Dpto. Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica*. DOI: :10.5821/sibb.v12i1.1718
- Danila M. Korotin, S. B. (2012). Surface characterization of commercially pure titanium (cp-Ti) before and after chemical treatment using X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 87–91. DOI: 10.4236/jbnb.2012.31011

- Denver P. Linklater, Vladimir A. Baulin, Saulius Juodkazis, et al. (2020). Mechanobiological bactericidal effects of titanium nanostructures. *Nature Materials*, 31–37.
- Dulce Diana Cabañas Vargas, V. M. (2018). Luz solar y TiO₂ para eliminar patógenos contenidos en agua. *Redalyc*.
- Emeline, N. S. (2012). Semiconductor Photocatalysis — Past, Present, and Future Outlook. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 673–677. DOI: [10.1021/jz300071j](https://doi.org/10.1021/jz300071j)
- German A. Rodríguez Castro, J. V. (2025). Ingeniería de superficies en Titanio: La borurización. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior*, 14-20. DOI: [10.29057/escs.v12iEspecial.14989](https://doi.org/10.29057/escs.v12iEspecial.14989)
- Gerrity, D. L. (2018). Ozonation drawbacks and formation of bromate in water treatment systems. *Water Research*, 482–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.11.120>
- Hassaan, M. E.-N. (2023). Principles of Photocatalysts and Their Different Applications. *Springer Nature*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41061-023-00444-7>
- Idalia ORRANTIA, D. A. (2019). FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA PARA LA REMOCIÓN DE ANTIMONIO (Sb) EN AGUA. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 65-71. DOI: [10.20937/RICA.2019.35.esp03.08](https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.esp03.08)
- ImageJ. (2024). Obtenido de ImageJ: <https://imagej.net/ij/>
- J. Lario Femenia, A. (2016). Influencia del voltaje en la formación de nanotubos en aleaciones α , $\alpha+\beta$ y β de titanio. *Congreso Anual de la sociedad Española de ingeniería Biomedica*.
- Joan Lario, O. (2018). EFECTO DE UN TRATAMIENTO TÉRMICO SOBRE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA Y MORFOLOGÍA DE NANOTUBOS DE TiO₂ OBTENIDOS POR ANODIZADO. *Rev. LatinAm. Metal. Mat.* DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7796343>
- Juan Carlos Durán–Álvarez, E. A. (2015). Descontaminación de agua utilizando nanomateriales y procesos fotocatalíticos. *Mundo Nano*. DOI: <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2015.14.52510>

- Katz, A. (2020). UV disinfection limitations and microbial DNA repair mechanisms in water treatment. *Science of the total environment*, 141-164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2025.100454>
- Krumdieck, S. P. (2019). Nanostructured TiO₂ anatase-rutile-carbon solid coating with visible light antimicrobial activity. *Scientific Report*. DOI: [10.1038/s41598-018-38291-y](https://doi.org/10.1038/s41598-018-38291-y)
- Llanes, C. Y., & Benavides, A. C. (2011). FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON TiO₂ PARA EL TRATAMIENTO DE DESECHOS LÍQUIDOS CON PRESENCIA DEL INDICADOR VERDE DE BROMOCRESOL. *Rev. ing. univ. Medellín*.
- Llanos-Cuentas, A. (2016). Transmisión de infecciones nosocomiales por el personal de salud. *Revista Medica Herediana*, 73-74. DOI: [10.20453/rmh.v27i2.2840](https://doi.org/10.20453/rmh.v27i2.2840)
- López-Cerero, L. (2013). Papel del ambiente hospitalario y los equipamientos en la transmisión de las infecciones nosocomiales. *ELSEVIER*, 459-464. DOI: [10.1016/j.eimc.2013.10.004](https://doi.org/10.1016/j.eimc.2013.10.004)
- Lorenzo. (2017). FotoCatalisis de superficies de TiO₂. *FluidoMecanica*.
- Luis Escobar-Alarcón, D. A.-C. (2021). Desarrollo de fotocatalizadores basados en TiO₂ en forma de película delgada para la degradación de moléculas orgánicas en solución acuosa. *Mundo Nano*. DOI: <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69646>
- Macak, J. M. (2021). Current Opinion in Solid State and Materials Science.
- María C. Nevárez-Martínez, P. J.-M.-C. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO₂. *Avances en Química*.
- María de las Mercedes Cely Bautista, G. C. (2025). *Nano – Horizontes. Explorando el Mundo Invisible*. Pereira: Editorial Universidad Tecnológica de Pereira.
- Matin Bache, H. D.-P. (2019). Microstructural Control of Fatigue Behaviour in a Novel $\alpha + \beta$ Titanium Alloy. *MDPI*. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9111200>
- Mingzhu Zhou, X. Z. (2024). Visible light-induced photocatalytic and antibacterial adhesion properties of superhydrophilic TiO₂ nanoparticles. *Scientific Report*, 14. DOI: [10.1038/s41598-024-58660-0](https://doi.org/10.1038/s41598-024-58660-0)

- Orts, M. A. (2015). Síntesis y caracterización de nanoestructuras complejas de óxidos semiconductores. *Departamento de Física de Materiales, Facultad de CC. Físicas, UCM*.
- P. Franconetti, J. C. (2013). Efecto de las variables de proceso sobre el comportamiento a flexión de aleaciones Ti - 3% at. X (X = Nb, Ta) obtenidas por pulvimetalurgia. *Revista de metalurgia*, 416-422.
DOI: [10.3989/revmetalm.1259](https://doi.org/10.3989/revmetalm.1259)
- PLANELL, F. G. (2015). Aplicaciones biomédicas del titanio y sus aleaciones. *BIOMECANICA*.
- R. Cancedda, A. C. (2017). Bulk and interface investigations of scaffolds and tissue-engineered bones by X-ray microtomography and X-ray microdiffraction. *Elsevier*, 2505-2524.
- reyes, P. s. (2012). LA INCORPORACIÓN DE METALES PESADOS EN LAS BACTERIAS Y SU IMPORTANCIA. *Redalyc*, 160.164.
- Reynaud Morales A.G, C. A. (2013). Preparación de nanoestructuras porosas de TiO₂ por anodización a bajo potencial en electrolito acuoso de CH₃COOH/HF. *Superf. vacío*.
- Richardson, S. D. (2018). Water treatment disinfection byproducts and emerging contaminants. *Analytical Chemistry*, 398–428.
- Santiago Arango Santander, C. R. (2016). Titanio aspectos del material para uso en ortodoncia. *Revista Nacional De Odontología*.
- Scott Sneddon, D. M. (2021). Deformation and failure behaviour of a titanium alloy Ti-407 with reduced aluminium content: A comparison with Ti-6Al-4V in tension. *ELSEVEIR*.
- Scott Sneddona, Y. X. (2021). Sensitivity of material failure to surface roughness: A study on titanium alloys Ti64 and Ti407. *ELSEVIER*.
- Sunada, K. W. (2003). Bactericidal activity of copper-deposited TiO₂ thin film under weak UV light illumination. *Environmental Science & Technology*, 4785–4789.
- Susan P. Krumdieck, R. B. (2019). Nanostructured TiO₂ anatase-rutile-carbon solid coating with visible light antimicrobial activity. *Scientific Reports*.
- University of Nottingham*. (s.f.). Obtenido de Nanoscale and Microscale Research Centre: <https://www.nottingham.ac.uk/nmrc/facilities/xps/x-ray-photoelectron-spectroscopy-xps.aspx>

Wang, Y. L. (2020). Surface-modified titanium alloys for antibacterial and biomedical applications. *Surface and Coatings Technology*.