

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE FÍSICA



Trabajo de graduación
**Puntos cuánticos de grafeno en
películas delgadas de dióxido de titanio:
deposición y caracterización.**

Presenta:

Nelson Fernando Méndez Cisneros MC19069

Para optar por el grado de:

Licenciado en Física

Docente Director:

Dr. Carlos Ernesto Rudamas Flores

Fecha:

18 de noviembre del 2025

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

Rector

M.Sc. Juan Rosa Quintanilla

Secretario General

Lic. Pedro Rosalío Escobar Castañeda

Fiscal General

Lic. Carlos Amílcar Serrano Rivera

Decana

M.Sc. Angela Gudelia Portillo de Pérez

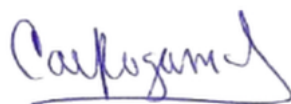
Vicedecano

Dr. José Nerys Funes Torres

Director de la Escuela de Física

Lic. Nelson Ediltrudys Gomez Cedilloso

Tribunal Calificador



Dr. Carlos Ernesto Rudamas Flores



M.Sc. Victor Laureano Cortez Lara



Lic. José Alfredo Díaz

Agradecimientos

La realización de esta tesis solo fue posible gracias al apoyo incondicional de mi familia, la cual siempre confió en mi sin importar las circunstancias, a Physics Solutions y el grupo de investigación del Dr. Calos Rudamas, quienes me apoyaron en todas las discusiones y desarrollo de prototipos. Mis más sinceros agradecimientos a todos ustedes por estar conmigo durante todo este recorrido y permitirme alcanzar mis metas.

Lista de publicaciones

Los resultados del presente trabajo han sido parcialmente presentados en los siguientes artículos científicos, capítulos de libro, ponencias y pósteres científicos.

Patente

- J. R. Quintanilla, C. Rudamas, O. Deodanes, C. Menjívar, N. Cisneros, and J. Cuadra, *Nano-compuestos basados en puntos cuánticos coloidales de sulfuro de cadmio y carbono grafeno para aplicaciones en luminarias LED*, patent application under review at the Centro Nacional de Registros (CNR), No. 20230032358 (2023).
Available at:
www.e.cnr.gob.sv/ServiciosOL/notificaciones/notificacion.htm?credencial=2VG1OL2QORMQWOTJIO

Artículos científicos y capítulos en libros

- N. Cisneros, J. Cuadra, and C. Rudamas, Development of a Low-Cost Surface Characterization Prototype for Solid and Liquid Samples *Proceedings of the IEEE CONCAPAN XLIII* pp. 1-5, (2025) DOI:10.1109/CONCAPAN66820.2025.11512611
- H. Ponce, J. Cuadra, C. Menjívar, O. Deodanes, N. Cisneros, and C. Rudamas, “Caracterización óptica y estructural de puntos cuánticos de carbono a base de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill),” *Realidad y Reflexión* **57**, 1 (2023).
Available at:
<https://camjol.info/index.php/RyR/article/view/16706>
- J. Cuadra, J. R. Estrada Garcia, N. Cisneros, M. Alvarenga, and C. Rudamas, “Optical properties of iron sulfide doped graphene quantum dots for photovoltaic applications,” in *Energy and Coastal Security, Resilience, and Workforce Development: Research and Applications with Puerto Rico as a Living Laboratory for Climate Adaptation*, edited by L. Castillo *et al.* (Springer Nature Switzerland, 2026), Vol. 2.
Available at:
www.amazon.com/Coastal-Security-Resilience-Workforce-Development/dp/303207973X
- O. Deodanes, N. Cisneros, J. C. Molina, J. Cuadra, H. Ponce, and C. Rudamas, “Carbon nanostructures-based LED prototypes for sustainable energy applications,” in *Energy and Coastal Security, Resilience, and Workforce Development: Research and Applications with Puerto Rico as a Living Laboratory for Climate Adaptation*, edited by L. Castillo *et al.* (Springer Nature Switzerland, 2026), Vol. 2.
Available at:
www.amazon.com/Coastal-Security-Resilience-Workforce-Development/dp/303207973X
- C. Rudamas, R. Estrada, O. Deodanes, N. Cisneros, J. Cuadra, and L. Alvarenga (2025) “Los puntos cuánticos y la energía renovable”, Chapter in book “Energías renovables: generación, distribución, almacenamiento y su impacto en los países en desarrollo”, F. Navarrete Ed., Astra Ediciones, México, ISBN 979-13-87837-05-1. <https://doi.org/10.61728/AE20252045>.

- C. Rudamas, J. Cuadra, O. Deodanes, N. Cisneros, H. Ponce, and J. C. Molina, “Caracterización óptica de puntos cuánticos de carbono y grafeno para la transición energética, in *Las energías renovables y la transición energética justa*, edited by F. E. Navarrete-Báez (Ave, 2024), Chap.2.
Available at:
<https://biblioteca.univa.mx/Investigacion/Libros/118246.pdf>
- C. Rudamas, J. Cuadra, N. Cisneros, O. Deodanes, H. Ponce, and J. C. Molina, Nanoestructuras para aplicaciones amigables con el medio ambiente, in *Latinoamérica ante el desafío de las energías renovables*, edited by F. E. Navarrete-Báez (Ave, 2023), Chap. 6. Available at:
https://www.researchgate.net/publication/373011759_Latinoamerica_ante_el_desafio_de_las_Energias_Renovables

Presentaciones en conferencias

- N. Cisneros, J. Cuadra, O. Deodanes, J. C. Molina, and C. Rudamas, “Medición del grosor de películas delgadas usando un prototipo de bajo costo,” presented at the *Congreso de Física y Geofísica de El Salvador 2024*, Universidad de El Salvador, El Salvador (2024).
- N. Cisneros, J. Cuadra, J. C. Molina, O. Deodanes, H. Ponce, and C. Rudamas, “Characterization of TiO₂ Films Deposited with a Homemade Spin Coater,” presented at the *III RCN Workshop*, Antigua Guatemala, Guatemala (2022).
- J. A. Cuadra Aparicio, J. C. Molina, N. Cisneros, F. Bonilla, R. Estrada, D. Pleitez, H. Ponce, and C. Rudamas, “Absorption Properties of Iron and Sulfur Doped Graphene Carbon Quantum Dots,” presented at the *APS Mid-Atlantic Section 2022 Meeting*, Pennsylvania State University, United States (2022). Available at: <https://meetings-archive.aps.org/mas/2022/e04/3/>.
- O. A. J. Deodanes, J. C. Menjívar Molina, N. Cisneros, D. A. R. Pleitez, J. A. Cuadra Aparicio, H. A. Ponce Elías, and C. Rudamas, “CdS Quantum Dot Surface Defect Emission for White Light Emitting Diodes,” presented at the *APS Mid-Atlantic Section 2022 Meeting*, Pennsylvania State University, United States (2022). Available at:
<https://meetings.aps.org/Meeting/MAS22/Session/E04.5>

Posters científicos

- J. C. Molina, D. Pleitez, N. Cisneros, O. Deodanes, F. Bonilla, R. Estrada, W. Abarca, J. Cuadra, H. Ponce, and C. Rudamas, “Nanostructures and Thin Films for Environmentally Friendly Applications,” poster presented at the *Purdue Climate Fellows Program* (2022).
Available at:
<https://blueintegratedpartners.org/purdue-climate-fellows-2022>
- J. C. Menjívar Molina, N. Cisneros, O. A. J. Deodanes, D. A. R. Pleitez, J. A. Cuadra Aparicio, H. Ponce, and C. Rudamas, “Resonant Photoluminescence of Surface Defects in Colloidal CdS QDs,” poster presented at the *30th International Materials Research Congress (IMRC XXX)*, Cancún, Mexico (2022). Available at: <https://meetings.aps.org/Meeting/MAS22/Session/E04.5>.
- N. Cisneros, F. Bonilla, A. Portillo, A. Landaverde, D. Valenzuela, J. C. Molina, S. de la O, G. Rivas, H. Ponce, and C. Rudamas, “Quantum Dots from Algae: Preparation and Characterization,” poster presented at the *Conference on Coastal Resilience and Climate Adaptation*, University of Puerto Rico–Bayamón, Puerto Rico (2024).

Índice general

Agradecimientos	IV
Índice de general	VIII
Índice de figuras	X
Resumen	I
Introducción	III
1. Fundamento teórico	1
1.1. Dióxido de titanio	1
1.1.1. Propiedades ópticas y electrónicas	1
1.1.2. Propiedades estructurales	2
1.2. Grafeno	2
1.2.1. Propiedades estructurales	3
1.2.2. Propiedades ópticas	3
1.3. Puntos cuánticos	4
1.4. Puntos cuánticos semiconductores	4
1.4.1. Puntos cuánticos de carbono-grafeno	5
1.5. Películas delgadas	5
1.6. Métodos de preparación	6
1.6.1. Pulverización	6
1.6.2. Doctor blading	7
1.6.3. Inmersión	7
1.6.4. Recubrimiento giratorio (Spin-coating)	8
1.6.5. Propiedades estructurales de las películas delgadas	9
1.6.6. Propiedades ópticas de las películas delgadas	9
1.7. Modelado óptico en películas delgadas	10
1.7.1. Índice de refracción complejo	10
1.7.2. Interferencia óptica	10
1.8. Interacción de la radiación electromagnética con la materia	10
1.8.1. Absorción	10
1.8.1.1. Ley de Beer-Lambert-Bouguer	10
1.9. Estado del conocimiento	11
2. Metodología	13
2.1. Preparación del TiO_2	13
2.2. Síntesis de nanoestructuras	13
2.3. Caracterización óptica de los materiales preparados	14
2.4. Fabricación de películas delgadas	15
2.5. Tratamiento de muestras	15
2.6. Caracterización óptica de las películas delgadas.	16

2.7. Caracterización estructural de películas delgadas	16
3. Resultados y discusión	19
3.1. Comportamiento óptico de las soluciones de TiO_2	19
3.2. Síntesis de puntos cuánticos de grafeno	20
3.3. Comportamiento óptico de muestras de películas delgadas TiO_2	21
3.4. Comportamiento óptico de muestras de QDs mezclados con TiO_2	23
3.4.1. Análisis estructural	26
4. Conclusiones y recomendaciones	28
4.1. Conclusiones	28
4.2. Recomendaciones	29

Índice de figuras

1.1. Representación esquemática de las diferentes fases del TiO_2 . Fuente: elaboración propia.	2
1.2. Representación esquemática del grafeno. Fuente: elaboración propia.	3
1.3. Esquema de confinamiento cuántico	4
1.4. Influencia del tamaño de la nanoestructura	5
1.5. Esquema de deposición mediante técnica de pulverización modificado con el permiso del autor de la referencia [29]	6
1.6. Esquema de deposición mediante técnica de doctor blade. Fuente: elaboración propia.	7
1.7. Esquema del proceso de deposición por técnica de inmersión. Las flechas violetas representan el movimiento del sustrato, mientras que las flechas azules indican el flujo de la solución. Adaptado con permiso de los autores de la referencia [32].	8
1.8. Esquema de deposición mediante técnica recubrimiento giratorio, las flechas negras indican el siguiente paso en la metodología de preparación, modificado con el permiso del autor de la referencia [33]	9
1.9. Diagrama de los principales fenómenos físicos que ocurren durante la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Fuente: elaboración propia.	10
1.10. Esquema ilustrativo de la ley de Beer-Lambert-Bouguer. Fuente: elaboración propia.	11
1.11. Evolución temporal de la eficiencia de las tecnologías de películas delgadas, el gráfico es elaboración propia con permiso de la referencia [38].	12
2.1. Diferentes muestras de la solución para el polvo de TiO_2	13
2.2. Montaje experimental para medir el espectro de absorción de las muestras sintetizadas. Fuente: Elaboración propia.	14
2.3. Deposición mediante técnica de recubrimiento por giro (spin coating).	15
2.4. Montaje experimental para medir el espectro de absorción de películas delgadas.	16
2.5. Ubicación espacial de los puntos de medición de absorción.	16
2.6. Esquema representativo del arreglo óptico del prototipo interferométrico para la medición del grosor de películas delgadas.	17
2.7. Dispositivo LTS para la medición del grosor de películas delgadas.	17
2.8. a) Microscopio electrónico de barrido TESCAN VEGA-3 utilizado en la caracterización, b) configuración interna representativa del equipo, editado de [45].	18
2.9. Esquema representativo de la obtención del grosor de películas delgadas mediante observación transversal en SEM.	18
3.1. Espectro de absorción de la solución base de TiO_2	20
3.2. Espectro de absorción de puntos cuánticos de grafeno en solución coloidal.	21
3.3. Espectro de absorbancia de película delgada de la solución de dióxido de titanio variando los volúmenes de alcohol y agua.	22
3.4. Espectro de absorbancia de película delgada de la solución de TiO_2 mezclado con QDs variando los volúmenes de alcohol y agua.	23
3.5. Deconvolución gaussiana del espectro de absorción del TiO_2	24
3.6. Deconvolución gaussiana del espectro TiO_2 +GCQDs.	25
3.7. Espectros de absorbancia medidos en diferentes puntos espaciales de una película delgada.	26
3.8. Ajuste no lineal de medidas de interferencia láser.	26

3.9. Medición del grosor de la película delgada en diferentes puntos espaciales.	27
3.10. Imagen SEM de una película delgada de TiO_2	28
4.1. Fotografía de película delgada de TiO_2 depositada sobre un sustrato de Borosilicato.	33
4.2. Fotografía de la primer versión del prototipo de medición mediante interferencia laser desarrollado durante el presente trabajo.	33
4.3. Diseño 3D de la plataforma móvil del dispositivo LTS desarrollado	34
4.4. Impresión 3D de la plataforma móvil del dispositivo LTS desarrollado	34
4.5. Imagen de interfaz gráfica del prototipo en funcionamiento.	35
4.6. Espectros de absorbancia de distintas muestras de TiO_2 -GCQDs.	35
4.7. Espectros de absorbancia de la película delgada S2 utilizando diferentes volúmenes de etanol y tiempo de homogenización	36
4.8. Imagen SEM de película de TiO_2 vista superficialmente	36
4.9. Imagen SEM de los aglomerados de TiO_2 formados en la preparación	37
4.10. Imagen SEM de vista lateral de película delgada de TiO_2	38
4.11. Análisis de energía de dispersión de rayos X de película delgada de TiO_2	39

Resumen

En esta investigación se obtuvieron puntos cuánticos de grafeno (GCQDs) mediante pirólisis de ácido cítrico y se prepararon películas delgadas de dióxido de titanio (TiO_2) y puntos cuánticos de grafeno. Para la deposición de las películas delgadas de dióxido de titanio y grafeno sobre sustratos de borosilicato y aluminio se empleó el método de recubrimiento por giro (spin-coating) de bajo costo.

Se evaluó la absorción óptica de las películas mediante espectroscopía UV-Vis, analizando los efectos de distintas proporciones de alcohol y agua en la solución precursora, así como del grosor de la película. Los resultados mostraron una banda característica centrada en 325 nm atribuida al TiO_2 , así como una modulación del espectro al incorporar GCQDs, indicando posibles mecanismos de transferencia de carga y formación de heterouniones entre ambas fases.

La caracterización estructural se realizó mediante un sistema interferométrico láser de bajo costo, validado con imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM), confirmando espesores promedio del orden de $\sim 10 \mu\text{m}$.

Los hallazgos demuestran que la integración controlada de GCQDs en matrices de TiO_2 permite modificar favorablemente sus propiedades ópticas, abriendo nuevas rutas para la optimización de materiales funcionales mediante técnicas accesibles en contextos de recursos limitados.

Introducción

El desarrollo de materiales funcionales mediante técnicas accesibles y de bajo costo representa uno de los desafíos actuales en ciencia de materiales, especialmente en contextos académicos y tecnológicos de países en vías de desarrollo. En este marco, las películas delgadas han emergido como una alternativa versátil en diversas aplicaciones, como dispositivos optoelectrónicos, sensores, recubrimientos protectores y tecnologías fotovoltaicas. Su utilidad se basa en la posibilidad de modificar propiedades ópticas, electrónicas y estructurales del sustrato con cantidades mínimas de material activo.

El dióxido de titanio (TiO_2) es un material semiconductor ampliamente estudiado por su alta estabilidad química, baja toxicidad y destacadas propiedades fotocatalíticas. En forma de nanopartículas o películas delgadas, el TiO_2 presenta una banda prohibida del orden de 3.2 eV (fase anatasa), que lo hace fotoactivo bajo irradiación ultravioleta. Estas propiedades lo han posicionado como componente esencial en celdas solares sensibilizadas por colorante, recubrimientos autolimpiables y sensores ambientales [1].

De manera complementaria, los puntos cuánticos de grafeno (Graphene Quantum Dots, GCQDs) representan una clase emergente de nanomateriales basados en carbono, que combinan propiedades intrínsecas del grafeno como alta conductividad eléctrica y estabilidad mecánica con fenómenos de confinamiento cuántico en dimensiones nanométricas. Su emisión sintonizable, biocompatibilidad y comportamiento óptico ajustable los convierten en candidatos ideales para mejorar la respuesta funcional de dispositivos basados en TiO_2 .

Sin embargo, la caracterización y fabricación de estos sistemas suele depender de equipamiento costoso y técnicas sofisticadas, lo cual limita su estudio en entornos de recursos restringidos. En respuesta a esta problemática, en este trabajo se propone el uso de métodos de síntesis y deposición de bajo costo, tales como la pirólisis controlada de ácido cítrico para la obtención de GCQDs y el recubrimiento por giro (spin coating) para la fabricación de películas delgadas.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar la interacción óptica entre las películas delgadas de TiO_2 /GCQDs. Para ello, se estudia la variación de las propiedades de absorción en función de la composición de la solución precursora, y el acoplamiento óptico mediante espectroscopía UV-Vis y un sistema de interferometría láser de bajo costo desarrollado específicamente para este fin.

Los estudios de UV-Vis e interferometría no se validan con SEM; sin embargo, estas técnicas se complementan, pues el SEM permite correlacionar la morfología y el espesor de las películas con las propiedades ópticas obtenidas mediante los métodos mencionados. De esta manera, la comparación entre técnicas ópticas y de microscopía ofrece una caracterización más completa del sistema híbrido estudiado.

Este trabajo aporta al desarrollo de alternativas viables para el análisis y fabricación de películas delgadas, abriendo la posibilidad de adaptar estos materiales a aplicaciones tecnológicas en entornos de bajo presupuesto y contribuyendo al fortalecimiento de aptitudes en laboratorios universitarios.

Capítulo 1

Fundamento teórico

El presente capítulo desarrolla los conceptos fundamentales relacionados con los materiales, modelos ópticos y fenómenos físicos empleados en esta investigación, la cual se centra en la fabricación y caracterización de películas delgadas de dióxido de titanio (TiO_2) modificadas con puntos cuánticos de grafeno-carbono (GCQDs). El objetivo es comprender cómo las propiedades electrónicas, ópticas y estructurales de estos materiales se combinan para mejorar la respuesta fotovoltaica de heteroestructuras basadas en TiO_2 .

Se aborda inicialmente la física del TiO_2 como semiconductor, seguida de una revisión detallada del confinamiento cuántico en puntos cuánticos de carbono-grafeno. Posteriormente, se analizan los principios físicos relevantes para la síntesis y modelado óptico de películas delgadas, haciendo énfasis en la interferencia y las ecuaciones de Fresnel. Finalmente, se presenta un estado del arte actualizado de los avances recientes en la integración de GCQDs con TiO_2 .

1.1. Dióxido de titanio

El dióxido de titanio (TiO_2) es un material semiconductor ampliamente utilizado en aplicaciones tecnológicas como la fotocatalisis, sensores y celdas solares. Esto se debe a su alta estabilidad química, baja toxicidad y notable actividad fotoquímica bajo irradiación ultravioleta [2, 3].

Este compuesto puede encontrarse en tres fases cristalinas principales: anatasa, rutilo y brookita. De estas, la fase anatasa es la más empleada en el ámbito de los nanomateriales debido a su mayor eficiencia en procesos fotocatalíticos [4].

1.1.1. Propiedades ópticas y electrónicas

El TiO_2 presenta una energía de banda prohibida (E_g) dependiente de su fase cristalina, lo cual determina su absorción principalmente en la región ultravioleta del espectro electromagnético:

- **Anatasa:** $E_g \approx 3,2$ eV, correspondiente a $\lambda \sim 387$ nm.
- **Brookita:** $E_g \approx 3,3$ eV ($\lambda \sim 380$ nm).
- **Rutilo:** $E_g \approx 3,0$ eV ($\lambda \sim 413$ nm) [5].

En películas delgadas con espesores en el rango de 1 a 10 μm , como las empleadas en este trabajo, las propiedades ópticas están dominadas por el comportamiento del material a escala macroscópica, por lo que los efectos de confinamiento cuántico pueden considerarse despreciables. En este régimen, el TiO_2 mantiene un alto índice de refracción (entre 2.5 y 2.9) y una fuerte dispersión óptica [6].

Asimismo, el espesor de la película influye significativamente en la respuesta óptica, dando lugar a fenómenos de interferencia óptica que afectan la transmitancia y reflectancia del material. Estas características son

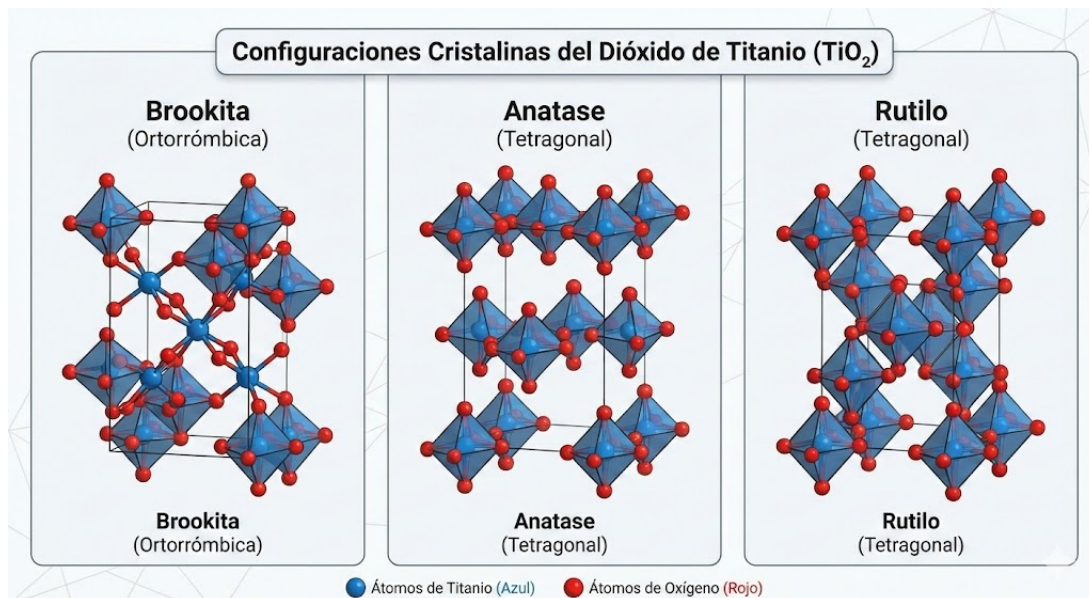


Figura 1.1: Representación esquemática de las diferentes fases del TiO_2 . Fuente: elaboración propia.

particularmente relevantes en aplicaciones como recubrimientos ópticos y dispositivos fotovoltaicos, incluyendo celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC) [7].

Finalmente, su elevada absorbancia en la región ultravioleta, combinada con su transparencia parcial en el visible (dependiendo del espesor y la microestructura), lo convierte en un material adecuado para aplicaciones optoelectrónicas y de protección UV.

1.1.2. Propiedades estructurales

El TiO_2 puede cristalizar en tres fases principales: anatasa y rutilo, ambas con estructura tetragonal, y brookita, de estructura ortorrómbica [4]. La fase presente en el material depende en gran medida de las condiciones de síntesis y tratamiento térmico, tales como la temperatura, el tiempo de recocido y la atmósfera de procesamiento.

En películas delgadas con espesores en el rango de 1 a 10 μm , la estructura cristalina y la microestructura (tamaño de grano, orientación preferencial y grado de cristalinidad) juegan un papel fundamental en las propiedades físicas del material. En particular, la fase anatasa suele formarse a temperaturas relativamente bajas y presenta gran estabilidad en estructuras finas, mientras que a temperaturas superiores a 600°C tiende a transformarse en rutilo, fase termodinámicamente más estable [8].

Además, parámetros como la porosidad y la rugosidad superficial, fuertemente influenciados por el método de deposición, afectan significativamente propiedades como la adherencia, la densidad y el comportamiento óptico de la película.

Existen diversos métodos para la síntesis y deposición de películas delgadas de TiO_2 , entre los que destacan el método sol-gel, el crecimiento hidrotérmico, la microemulsión y el depósito en capa atómica (ALD) [9]. Cada uno de estos métodos permite un control específico sobre la microestructura y la fase cristalina obtenida.

1.2. Grafeno

El grafeno es una estructura bidimensional compuesta por una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal. Este alótropo del carbono ha despertado un gran interés científico debido a sus extraordinarias propiedades electrónicas, mecánicas y térmicas, siendo un material clave en el desarrollo de tecnologías avanzadas, especialmente en el área de sensores y dispositivos optoelectrónicos [10, 11].

Representación Esquemática del Grafeno (Monocapa)

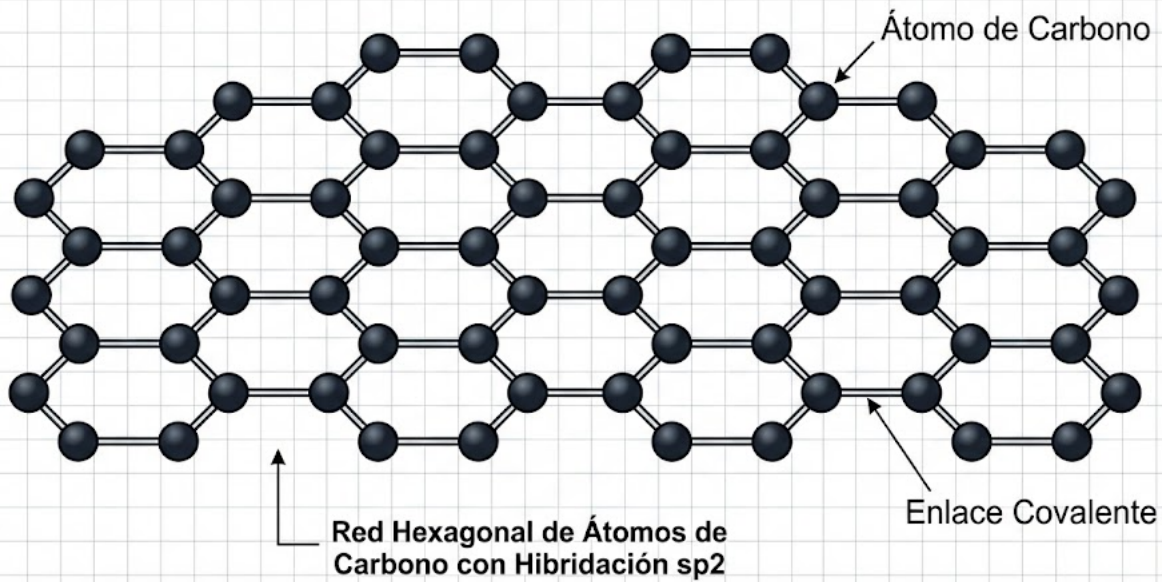


Figura 1.2: Representación esquemática del grafeno. Fuente: elaboración propia.

1.2.1. Propiedades estructurales

El grafeno presenta una estructura plana hexagonal, donde los átomos de carbono están enlazados mediante enlaces sp^2 [12]. Tiene una resistencia mecánica excepcional, con valores de ruptura cercanos a 130 GPa y un módulo de Young del orden de 1 TPa [13]. Su espesor corresponde al de una sola capa atómica, aproximadamente 0.34 nm.

Puede obtenerse mediante diversos métodos, como la exfoliación mecánica, deposición química en fase de vapor (CVD), o reducción de óxidos de grafeno [14].

Presenta una movilidad electrónica muy alta, superior a $15,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, lo que lo hace ideal para aplicaciones en electrónica de alta velocidad [15].

1.2.2. Propiedades ópticas

Cada capa de grafeno es capaz de absorber aproximadamente un 2.3% de la luz blanca incidente, lo que lo convierte en un material casi transparente [16]. En su forma pura, el grafeno presenta una banda prohibida nula, lo que lo clasifica como un semimetal. Sin embargo, esta brecha puede abrirse mediante procesos de dopaje o funcionalización química, ampliando sus aplicaciones optoelectrónicas [17].

Aunque el grafeno en estado puro muestra una fotoluminiscencia muy débil, al estructurarse en forma de puntos cuánticos (GQDs) puede emitir luz en el rango visible [18].

En el grafeno, la estructura electrónica presenta puntos de cruce lineales entre las bandas de conducción y de valencia en los denominados *puntos Dirac*. A diferencia de los semiconductores convencionales, donde ambas bandas están separadas por una brecha energética finita, en el grafeno estas bandas se tocan exactamente en dichos puntos, dando lugar a una **banda prohibida nula**. Esta característica implica que los electrones se comportan como fermiones relativistas sin masa efectiva, lo que confiere al material una elevada movilidad electrónica y una respuesta óptica continua en un amplio rango espectral. Debido a esta ausencia de brecha, el grafeno no actúa como semiconductor tradicional, sino como un **semimetal** o *metal de Dirac*, ya que posee una densidad de estados nula en el nivel de Fermi pero permite la conducción mediante excitaciones electrónicas incluso a energías muy bajas [19, 20]. Esta configuración limita su fotoluminiscencia intrínseca, pero al

estructurarse en tamaños nanométricos (como en los puntos cuánticos de grafeno), aparece un confinamiento cuántico que **abre una banda prohibida efectiva**, permitiendo la emisión de luz en el visible y ampliando significativamente sus aplicaciones en sensores ópticos, bioimagen y dispositivos optoelectrónicos avanzados [21].

1.3. Puntos cuánticos

Se denominan puntos cuánticos (Quantum Dots, QDs) a estructuras multi-atómicas en las cuales los portadores de carga han sido confinados en sus tres dimensiones espaciales [22, 23].

El confinamiento espacial de los portadores de carga origina una redistribución de la densidad de estados (DOS). Como consecuencia, los QDs presentan diferencias notables en sus propiedades ópticas, electrónicas y mecánicas respecto a su estado a granel.

Históricamente, los primeros QDs sintetizados fueron a partir de elementos metálicos semiconductores. Posteriormente, fueron descubiertos QDs formados por elementos como el carbono.

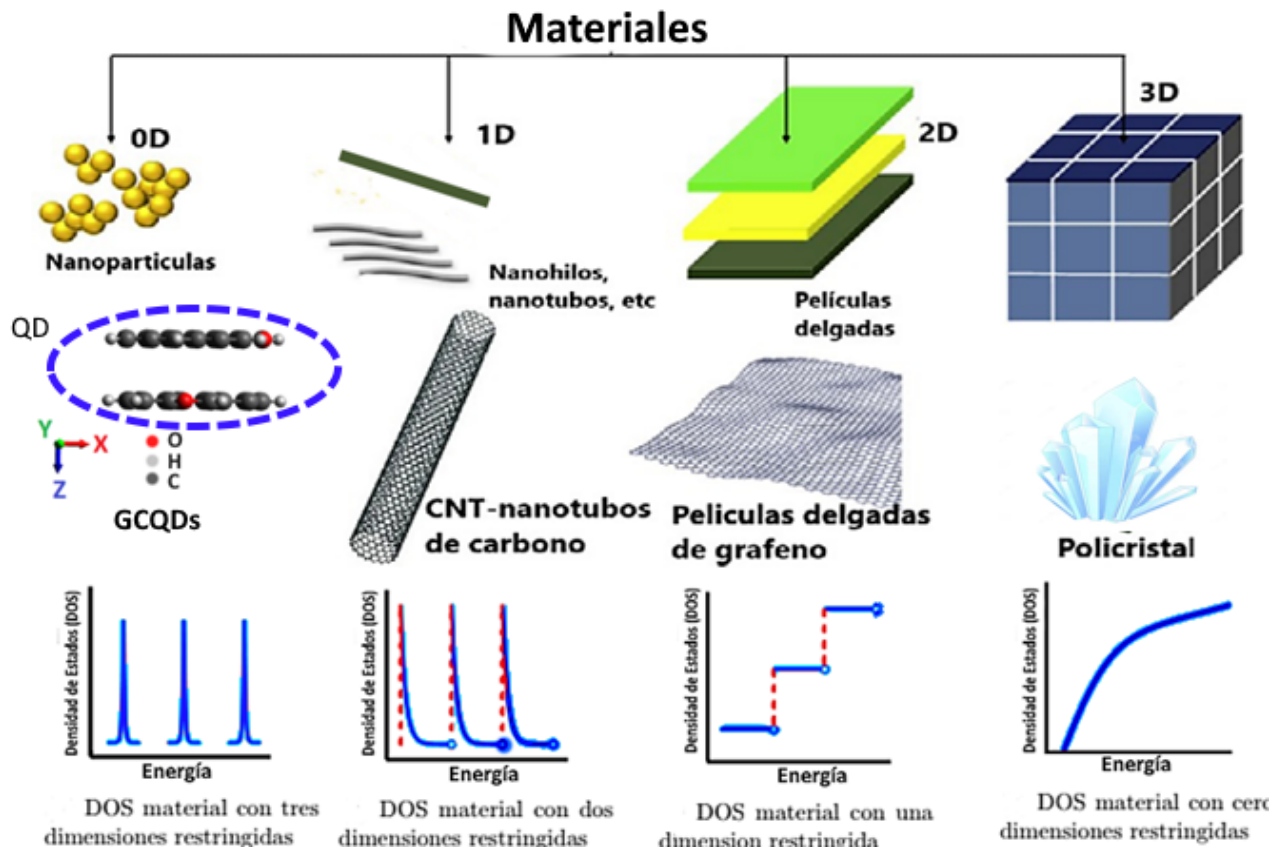


Figura 1.3: Representación de un material y su densidad de estados correspondiente para diferentes niveles de restricción espacial. En la derecha se observa el caso para bulk. Las restricciones espaciales sobre una y dos dimensiones se muestran en la segunda posición, luego se describen los casos de Quantum Wells y Quantum Wires correspondientemente. Mientras el caso de restricción espacial total, esto sería un QDs, se observa en la izquierda. Fuente: elaboración propia.

1.4. Puntos cuánticos semiconductores

Los QDs metálicos o semimetálicos son sintetizados a partir de elementos como Cd, Pb, Se o Te. Sin embargo, presentan alta toxicidad, lo que limita su uso [24]. Una de sus propiedades más destacadas es la dependencia de la absorción y luminiscencia con el tamaño de la estructura [25, 26].

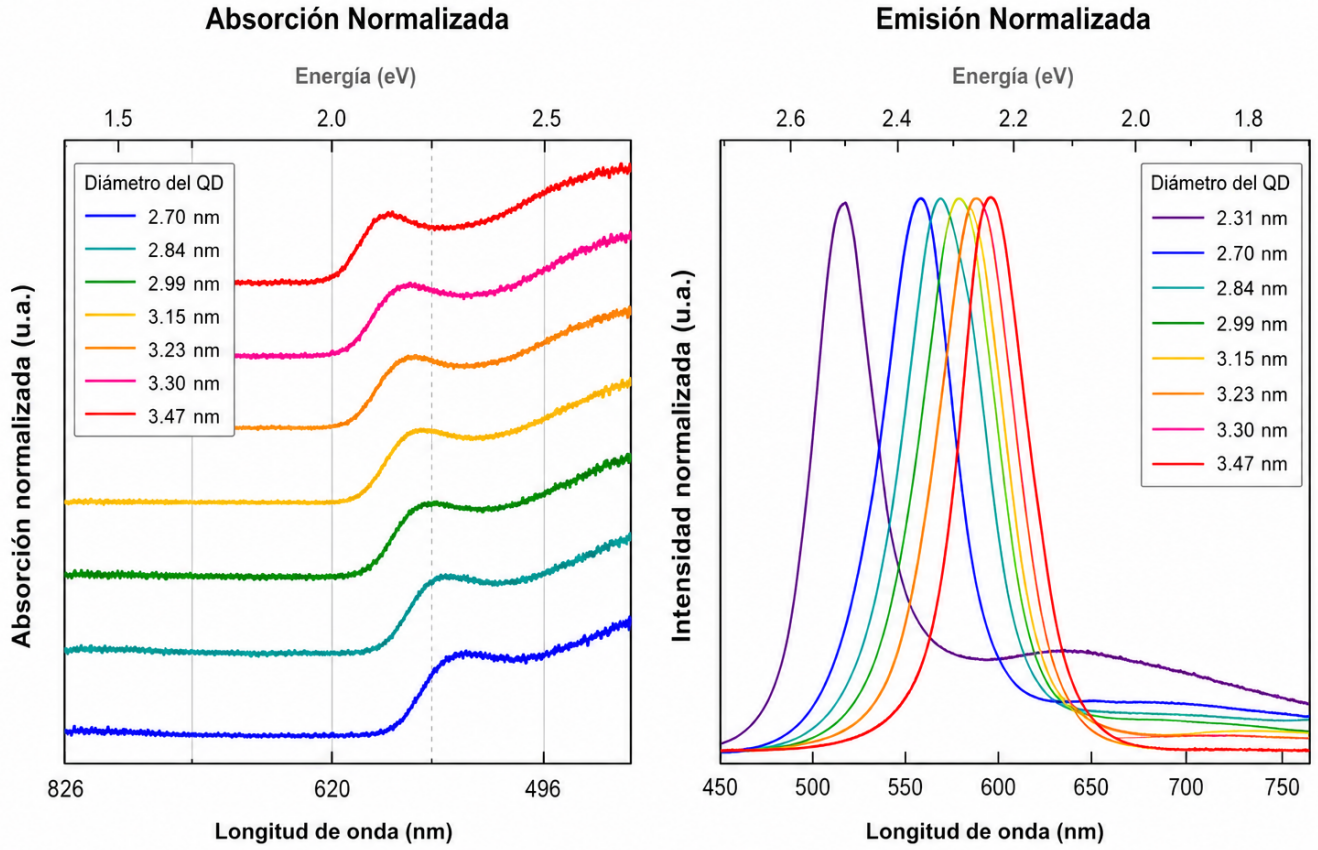


Figura 1.4: Dependencia de los espectros de absorción (a) y luminiscencia (b) respecto al tamaño de la nanoestructura, para QDs de CdSe modificado con el permiso de los autores de la referencia [27]

1.4.1. Puntos cuánticos de carbono-grafeno

Dentro de los QDs semiconductores orgánicos destacan los de carbono y carbono-grafeno. Los puntos cuánticos de carbono-grafeno están conformados por láminas de grafeno apiladas en estructura cilíndrica; si esta se deforma hasta volverse esférica, se obtiene un punto cuántico de carbono. Estos QDs han sido reportados como potenciales candidatos para aplicaciones fotovoltaicas [28]. Además de ya poseer otras aplicaciones como baterías, biomarcadores, sensores, entre otras [25, 26].

1.5. Películas delgadas

Se entiende por película delgada a una capa de material, con espesores que pueden ir desde unos pocos nanómetros hasta varios micrómetros. Se emplean para modificar las propiedades ópticas y electrónicas de diferentes materiales, lo que permite el desarrollo de dispositivos avanzados [9]. Entre los sectores más beneficiados del uso de películas delgadas se encuentran la optoelectrónica y los recubrimientos ópticos. También se han investigado películas ferromagnéticas para aplicaciones electrónicas.

Además, la tecnología de películas delgadas se ha posicionado como una estrategia eficaz para reducir el costo de los sistemas fotovoltaicos, debido al menor uso de material activo en su fabricación. Dentro de los distintos tipos, las películas delgadas cerámicas son de las más utilizadas, destacando por su dureza relativa y resistencia química. Estas cualidades las hacen apropiadas para su uso como recubrimientos protectores contra la corrosión, oxidación y desgaste, prolongando la vida útil de herramientas y componentes [29].

1.6. Métodos de preparación

Las películas delgadas se pueden fabricar mediante diferentes métodos físicos y químicos, dependiendo del tipo de material y el grosor deseado. Las principales técnicas físicas de deposición que usualmente son utilizados para el crecimiento epitaxial de capas delgadas y nanoestructuras son: i) Deposición de Laser Pulsado (PLD, del ingles Pulsed Laser Deposition) , ii) Deposición por Bombardeo (Sputtering Deposition) y (iii) Epitaxia de Haces Moleculares (MBE, del ingles Molecular Beam Epitaxy). Estas tres técnicas estan dentro de la amplia categoría conocida como Deposición Física por Vapor (PVD del ingles Physical Vapor Deposition)[29].

1.6.1. Pulverización

Consiste en rociar una solución sobre el sustrato con un aerógrafo o un dispositivo similar que de pendiendo de la solución se podria hacer uso de campos eléctricos para ordenar el crecimiento, creando una capa irregular sobre un sustrato. El grosor de la película dependerá de la densidad de la solución

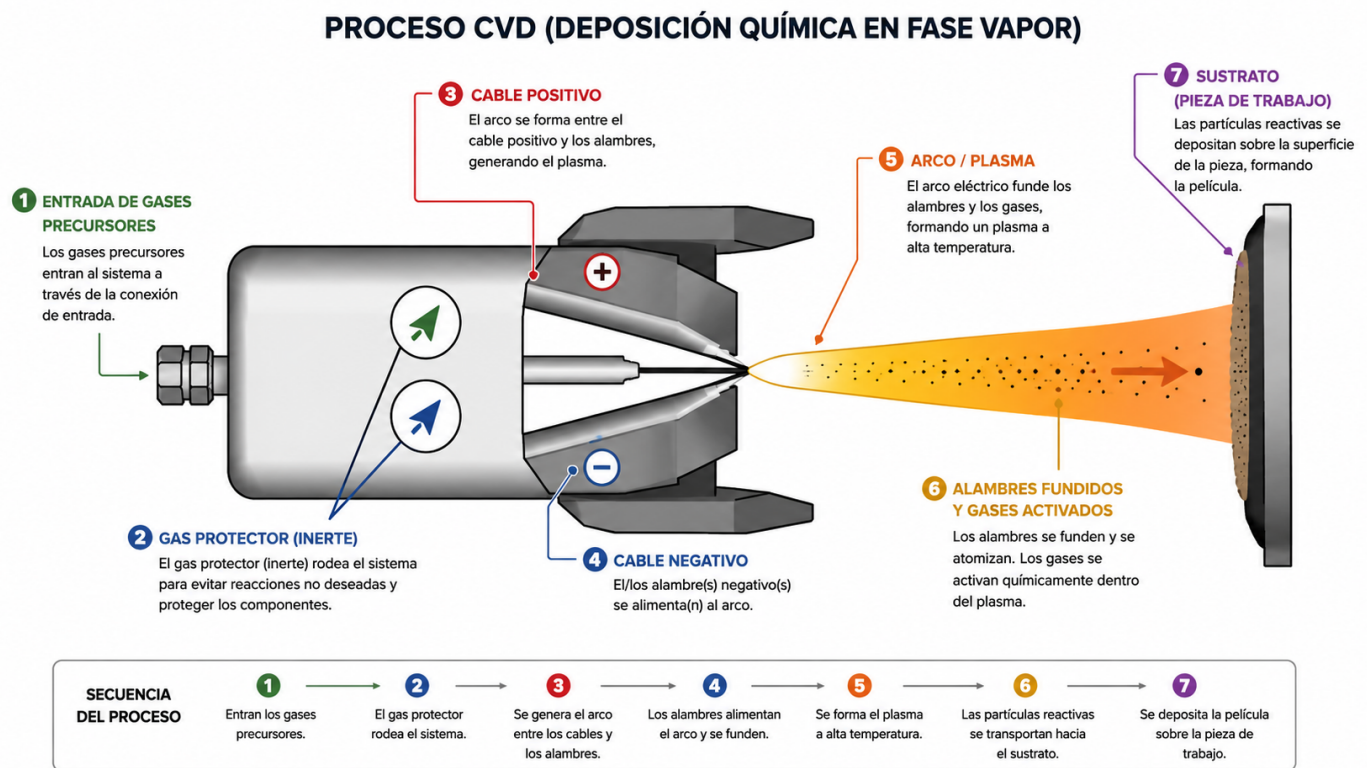


Figura 1.5: Esquema de deposición mediante tecnica de pulverización modificado con el permiso del autor de la referencia [29]

PLD es una técnica dedicada a la fabricación de capas delgadas. Esta técnica consiste en la deposición del material en un sustrato dentro de una cámara de vacío y enfocando un láser pulsado de alta energía para que choque sobre un blanco compuesto de los elementos que se van a depositar. El método PLD es una excelente herramienta en el laboratorio para una alta tasa de deposición epitaxial, multi-capas y sistemas de super-redes, [30]. Magnetron Sputtering es también una técnica PVD ampliamente usada para el crecimiento de películas delgadas. Esta técnica se basa en la expulsión de átomos de la superficie de un blanco por la transferencia de energía cinética de iones de Ar^+ entrantes generados en un plasma. La energía cinética de los iones entrantes varía desde 50 eV hasta 1000 eV. Esta técnica garantiza una transferencia estequiometría del material blanco al sustrato permitiendo el crecimiento de compuestos de multi-elementos y finalmente MBE es una técnica de deposición de vacío en la cual los haces térmicos de átomos o moléculas reaccionan en una superficie cristalina para producir películas epitaxiales y nanoestructuras, [30]. MBE ofrece excelentes controles composicionales

debido a que sus células de efusión pueden evaporarse homogéneamente. Sin embargo, la tasa de crecimiento es muy lento y de alto costo monetario. Otra técnica muy utilizada es la técnica de ablación láser, esta técnica consiste en remover material de una superficie usando una irradiación láser. La ablación láser consiste de dos partes, un láser pulsado en una cámara de ablación [31]. La potencia alta del haz del láser induce una gran absorción en la superficie del blanco lo que hace que la temperatura del material absorbente aumente rápidamente. Las técnicas de deposición descritas son buenas pero de alto costo. Algunos de los métodos de bajo costo más comunes son:

1.6.2. Doctor blading

Consiste en deslizar una cuchilla afilada sobre un sustrato previamente cubierto con una solución acuosa, formando una película delgada y uniforme. Este proceso se realiza generalmente en condiciones controladas de temperatura y humedad para asegurar la homogeneidad del recubrimiento, aunque también puede llevarse a cabo a temperatura ambiente en entornos industriales estándar. La velocidad de desplazamiento de la cuchilla, la viscosidad de la solución y la separación entre la cuchilla y el sustrato son parámetros clave que se ajustan según el resultado deseado.

Posteriormente, la película húmeda se seca ya sea de manera natural en condiciones ambientales o de forma acelerada mediante aire caliente o sistemas de secado asistido. Este método permite obtener películas en escala micrométrica, dependiendo de las condiciones del proceso y las características de la solución utilizada.

Su principal ventaja radica en la rapidez con la que se forma la película, lo que lo convierte en un método especialmente adecuado para aplicaciones industriales a gran escala.

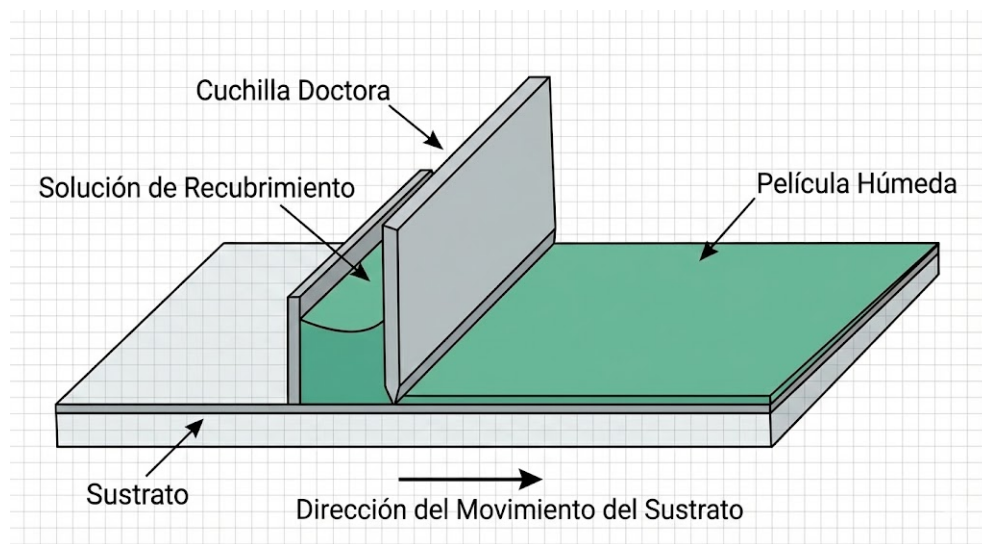


Figura 1.6: Esquema de deposición mediante técnica de doctor blade. Fuente: elaboración propia.

1.6.3. Inmersión

Consiste en sumergir el sustrato en una solución, con partículas precursoras y luego levantarlo lentamente, controlando la tensión superficial entre el sustrato y la solución. Se termina calentando para curar la película delgada. La fácil de aplicación del método limita el control del grosor de las películas, pero hace factible el método para uso industrial.

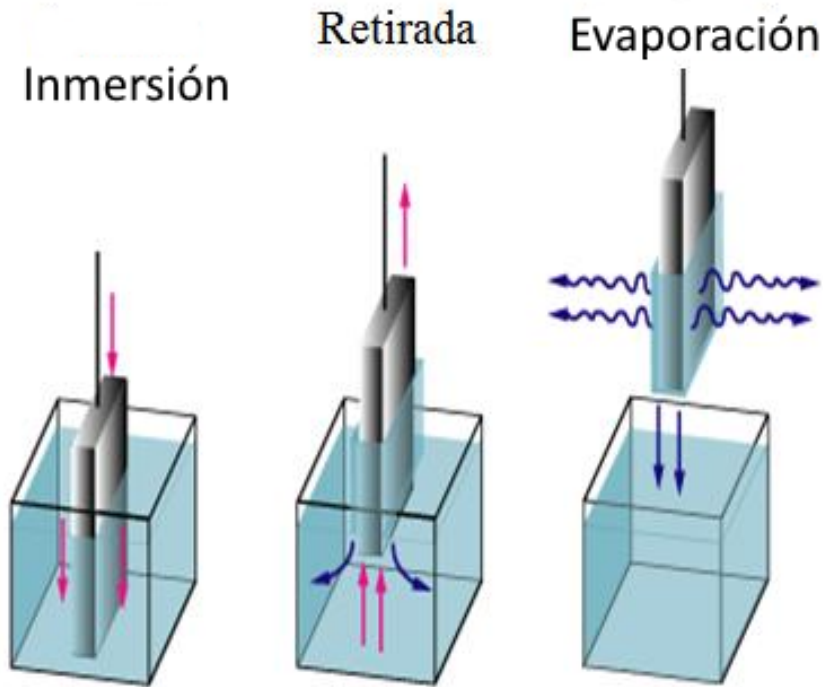


Figura 1.7: Esquema del proceso de deposición por técnica de inmersión. Las flechas violetas representan el movimiento del sustrato, mientras que las flechas azules indican el flujo de la solución. Adaptado con permiso de los autores de la referencia [32].

1.6.4. Recubrimiento giratorio (Spin-coating)

Consiste en depositar una gota de solución sobre el sustrato y hacerlo girar a alta velocidad, formando una película uniforme. La calidad y el espesor final de la película dependen de diversos parámetros fisicoquímicos de la solución, entre ellos la viscosidad, densidad y tensión superficial. Una mayor viscosidad suele producir películas más gruesas, mientras que soluciones menos viscosas tienden a extenderse más rápidamente, resultando en capas delgadas. La densidad del fluido influye en la dinámica de flujo centrífugo y en la estabilidad de la película durante el secado, afectando la uniformidad final.

Además, factores como la velocidad de giro, la aceleración, el tiempo de rotación y la volatilidad del solvente juegan un papel crucial en el proceso. Velocidades de giro más altas generan fuerzas centrífugas mayores que favorecen la formación de capas más delgadas y homogéneas, mientras que solventes con alta tasa de evaporación pueden producir gradientes de concentración que modifican la morfología superficial. En conjunto, el control preciso de estos parámetros permite ajustar el espesor, homogeneidad y calidad óptica de las películas delgadas obtenidas mediante *spin coating*, lo que vuelve esta técnica especialmente versátil para aplicaciones en optoelectrónica, fotónica y dispositivos funcionales.



Figura 1.8: Esquema de deposición mediante técnica recubrimiento giratorio, las flechas negras indican el siguiente paso en la metodología de preparación, modificado con el permiso del autor de la referencia [33]

1.6.5. Propiedades estructurales de las películas delgadas

La estructura de una película delgada influye directamente en sus propiedades ópticas, eléctricas y mecánicas. Las propiedades estructurales clave incluyen:

- **Cristalinidad:** Las películas pueden ser amorfas, policristalinas o monocristalinas, dependiendo del método de deposición y las condiciones térmicas. La cristalinidad influye en la movilidad de portadores de carga y en la respuesta óptica.
- **Orientación preferencial:** En películas policristalinas, algunos planos cristalográficos pueden crecer preferentemente, afectando propiedades anisotrópicas.
- **Tamaño de grano:** Granos más pequeños implican mayor densidad de bordes de grano, lo que puede aumentar la dispersión de portadores y alterar la transmitancia.
- **Espesor:** El espesor controla fenómenos de interferencia, resistencia eléctrica y respuesta mecánica.
- **Rugosidad superficial:** Influye en la dispersión de la luz y en la adhesión de capas posteriores o de moléculas en sensores.
- **Tensiones internas:** Dependiendo del método de síntesis, pueden generarse tensiones de compresión o tracción que afectan la estabilidad mecánica y la adhesión al sustrato.

1.6.6. Propiedades ópticas de las películas delgadas

Las propiedades ópticas de las películas delgadas dependen fuertemente del material, el espesor, la rugosidad superficial, la cristalinidad y el método de deposición. Entre las más relevantes se encuentran:

- **Índice de refracción:** Puede variar respecto al material a granel debido a la densidad reducida o la porosidad. Determina la interacción con la luz incidente, especialmente en fenómenos de interferencia.
- **Transparencia y absorbancia:** Las películas delgadas pueden ser altamente transparentes en ciertos rangos espectrales, o absorbentes si se busca optimizar la captura de luz (como en celdas solares). La absorbancia se relaciona con la banda prohibida del material.
- **Interferencia óptica:** Por su espesor comparable con la longitud de onda de la luz, presentan fenómenos de interferencia constructiva o destructiva, lo que da lugar a colores visibles y variaciones en la reflectancia.

1.7. Modelado óptico en películas delgadas

1.7.1. Índice de refracción complejo

La respuesta óptica se modela mediante:

$$\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) - i\kappa(\lambda),$$

donde κ está relacionado con la absorción mediante:

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}.$$

1.7.2. Interferencia óptica

La interacción de la luz con una película delgada produce interferencia debido a las múltiples reflexiones internas. Los coeficientes de Fresnel para incidencia normal son:

$$r_{01} = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad r_{12} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}.$$

El desfase óptico está dado por:

$$\delta = \frac{2\pi n_1 d}{\lambda}.$$

La reflectancia total se obtiene mediante la ecuación de Airy:

$$R = \frac{r_{01}^2 + r_{12}^2 + 2r_{01}r_{12}\cos(2\delta)}{1 + r_{01}^2 r_{12}^2 + 2r_{01}r_{12}\cos(2\delta)}.$$

Este modelo permite estimar el espesor de las películas a partir de espectros experimentales comparando las mediciones con las simulaciones.

1.8. Interacción de la radiación electromagnética con la materia

Cuando una onda electromagnética incide sobre la materia diferentes fenómenos físicos pueden ocurrir. Entre algunos fenómenos físicos se pueden mencionar la absorción, la luminiscencia y la dispersión. En la figura 1.9 se puede observar un diagrama de los fenómenos mencionados.

1.8.1. Absorción

Existen diversos modelos que describen el proceso de absorción de la radiación electromagnética por la materia. Entre los más representativos se encuentran la ley de Beer-Lambert-Bouguer, el modelo del oscilador forzado y el concepto de fuerza del oscilador.

1.8.1.1. Ley de Beer-Lambert-Bouguer

La ley de Beer-Lambert-Bouguer constituye un enfoque fenomenológico ampliamente utilizado para describir la absorción en muestras líquidas y gaseosas de baja concentración, así como en sólidos de reducido espesor.

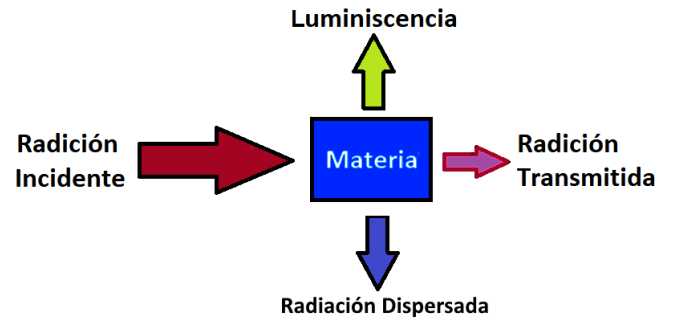


Figura 1.9: Diagrama de los principales fenómenos físicos que ocurren durante la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Fuente: elaboración propia.

Esta ley establece que, al penetrar una onda electromagnética en un medio material, su intensidad disminuye de forma exponencial en función de la distancia recorrida dentro del material y de la concentración de la muestra. En la figura 1.10 se muestra un esquema que ilustra esta relación. En dicho esquema, un haz de radiación de intensidad I_0 incide sobre una muestra de espesor b y superficie S . Al atravesarla, la intensidad del haz se reduce a un valor I .

Esta atenuación exponencial puede expresarse matemáticamente introduciendo una constante de decrecimiento, denominada sección eficaz $\sigma(\lambda)$, la cual cuantifica la fracción de radiación electromagnética de una longitud de onda determinada que es absorbida por la muestra. Con esta definición, la ley de Beer-Lambert-Bouguer puede escribirse como:

$$I(\lambda, c, x) = I_0 e^{-\sigma(\lambda)cx} \quad (1.1)$$

Un haz de radiación con intensidad inicial I_0 incide sobre una muestra de espesor b y superficie S . La radiación transmitida, de intensidad I , disminuye exponencialmente con la distancia x recorrida en el material.

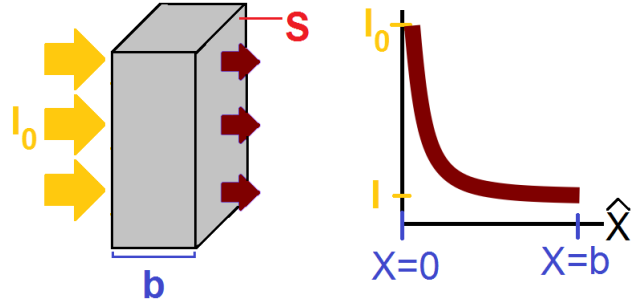


Figura 1.10: Esquema ilustrativo de la ley de Beer-Lambert-Bouguer. Fuente: elaboración propia.

1.9. Estado del conocimiento

En este estudio nos enfocamos en materiales que han sido previamente investigados en el Laboratorio de Espectroscopía Óptica de la Universidad de El Salvador, en coordinación con la Escuela de Física y la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática. Entre estos materiales, el **grafeno** destaca por su enorme potencial en aplicaciones científicas y tecnológicas. La estructura bidimensional del grafeno, formada por una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal, permite que sus electrones se desplacen con muy baja resistencia debido a su banda prohibida nula, lo que lo convierte en un excelente conductor eléctrico [34].

Además de sus propiedades electrónicas, el grafeno posee características mecánicas excepcionales. Estudios experimentales han mostrado que su estructura cristalina le confiere una resistencia extremadamente alta y una gran rigidez, manteniéndose a la vez como un material muy ligero. La densidad del grafeno se sitúa alrededor de $0,77 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente 200 veces menor que la del acero [13]. Esta combinación de baja densidad y alta resistencia, junto con su flexibilidad intrínseca, permite que pueda doblarse, enrollarse e incluso estirarse hasta un 20 % de su longitud sin comprometer significativamente su conductividad eléctrica [35]. Su estructura delgada, estable y altamente flexible favorece su uso en dispositivos electrónicos transparentes, sensores mecánicos y aplicaciones optoelectrónicas avanzadas.

El **dióxido de titanio** (TiO_2), por su parte, es un material abundante y de bajo costo, conocido por sus propiedades fotocatalíticas únicas que permiten la degradación de contaminantes y la purificación de aire y agua. La incorporación de grafeno en matrices de TiO_2 puede mejorar significativamente su eficiencia fotocatalítica, ya que el grafeno actúa como un eficiente aceptor y transportador de electrones, facilitando la separación de carga e inhibiendo la recombinación electrónica dentro del semiconductor.

Para controlar las propiedades electrónicas y ópticas del grafeno, se sintetizan nanoestructuras derivadas del carbono conocidas como **puntos cuánticos de grafeno** (GCQDs). Estos presentan alta conductividad, gran fotoestabilidad, solubilidad en agua, baja toxicidad y una absorción óptica sintonizable [36], lo que los convierte en excelentes candidatos para el diseño de nuevos prototipos optoelectrónicos. Además, la incorporación de GCQDs en películas de TiO_2 mejora la absorción en el rango visible y potencia la actividad fotocatalítica. La caracterización óptica de materiales híbridos basados en GCQDs y TiO_2 ha recibido creciente atención en los últimos años [37]. No obstante, aún persisten desafíos, entre ellos el control de la **homogeneidad del grosor** y la **distribución de los puntos cuánticos** sobre el sustrato, problemáticas intensificadas por el elevado costo

de muchos métodos de fabricación de películas delgadas.

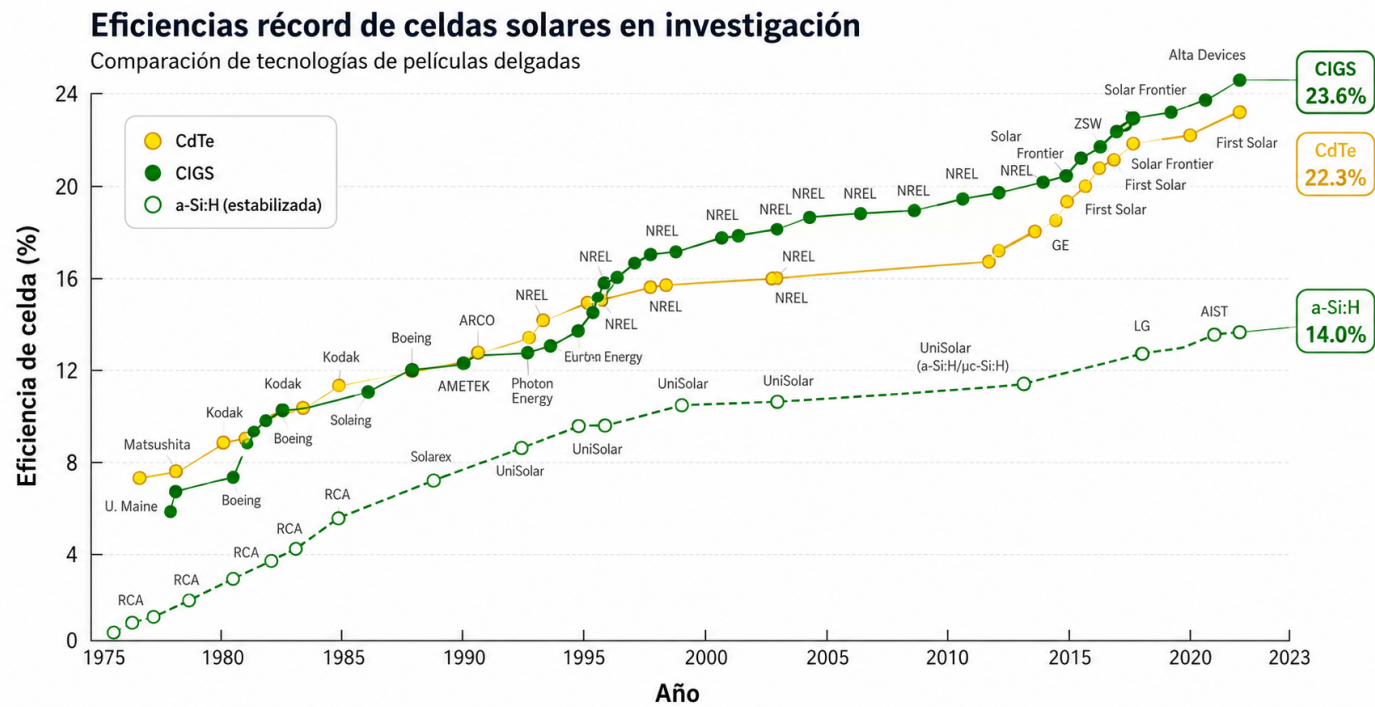


Figura 1.11: Evolución temporal de la eficiencia de las tecnologías de películas delgadas, el gráfico es elaboración propia con permiso de la referencia [38].

Con el objetivo de superar estas limitaciones, en esta investigación se propone el uso de un método de preparación de bajo costo que permita elaborar un gran número de muestras en distintas condiciones experimentales. Esto posibilita explorar y optimizar parámetros relevantes en la fabricación de películas delgadas, con miras al desarrollo de dispositivos fotovoltaicos eficientes y accesibles.

Capítulo 2

Metodología

2.1. Preparación del TiO_2

La preparación de la solución se hará utilizando 1 gramo de polvo de TiO_2 con predominancia en su configuración anatasa, con un band gap de 3.2 eV[39]. El solvente a utilizar es agua destilada con ácido acético y etanol absoluto para reducir la formación de grumos que nos afecten el grosor de nuestras películas delgadas por protonación como lo reporta[40]. Manteniendo la temperatura constante para evitar que se modifique la estructura electrónica como lo reporta en el método de dispersión coloidal asistido térmicamente [41]. se prepararon diferentes soluciones variando el ratio de agua destilada y etanol absoluto, usando 1 g de polvo de TiO_2 .

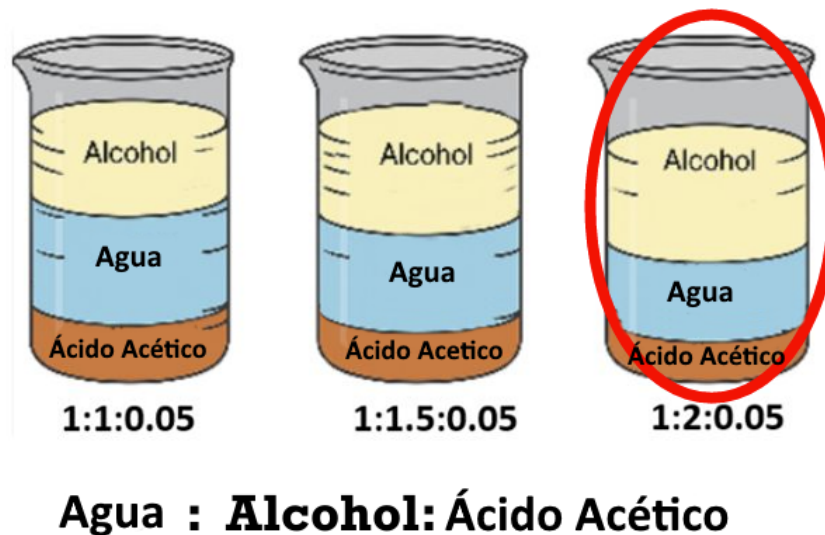


Figura 2.1: Diferentes muestras de la solución para el polvo de TiO_2 .

2.2. Síntesis de nanoestructuras

Se sintetizaron nanoestructuras de **carbono-grafeno (GCQDs) mediante pirólisis**. Se usaron **4 gramos de ácido cítrico** como fuente de carbono en 20 mL de agua destilada, la mezcla se calentó hasta **200°C por aproximadamente 15 minutos** hasta que el cambio de color (amarillo a marrón) indicó la presencia de nanoestructuras así como lo reporta [42]. Todo este proceso se realizará en el campus de la Universidad de El Salvador que se encuentra a aproximadamente 670 metros sobre el nivel del mar [43].

2.3. Caracterización óptica de los materiales preparados

Se medirá la Absorción (A_b) de las muestras obtenidas, para ello se usará un espectrógrafo Ocean Optics USB4000-UV-VIS con resolución espectral de 1.5 nm, para capturar los espectros. El diseño del espectrógrafo es tipo Czerny-Turner cruzado y cuenta con un arreglo de detectores de silicio con el código Toshiba TCD1304AP linear CCD array. Antes y después de cada medición se comprobará que los espectrógrafos a utilizar estén correctamente calibrados, esto se realizará midiendo el espectro emisión de una fuente de Mercurio, de esta manera se observará que las líneas espectrales de dicho elemento estén siendo detectadas en las longitudes de onda en las cuales son reportadas. De no ser así, se tomará en cuenta la cantidad por la cual estén defasadas y se corregirá en cada espectro medido. Luego se guardarán los datos colectados en un formato de texto, de preferencia Tab Delimited, con nombres adecuados que a su vez estarán guardados en carpetas que se crearán cada día que se tomen datos con su respectiva fecha y tipo de medidas. En el momento de obtener todas las medidas de este estudio, para cada muestra por medio del software SpectraSuite, se tomarán con el mismo tiempo de integración (tiempo en el cual el espectrógrafo colecta fotones y que sea adecuado para que no sature el espectrógrafo) y con la misma cantidad de escaneos para promediar (scan average) que determinan el número de adquisiciones espectrales que se recogerán antes de promediar los resultados y enviarlos al SpectraSuite. En el caso de las medidas de Absorbancia es necesario aclarar que se tomará la referencia de luz blanca y de la cubeta a utilizar (sin ninguna muestra, en otras palabras colectar I_0) antes de cada medición.

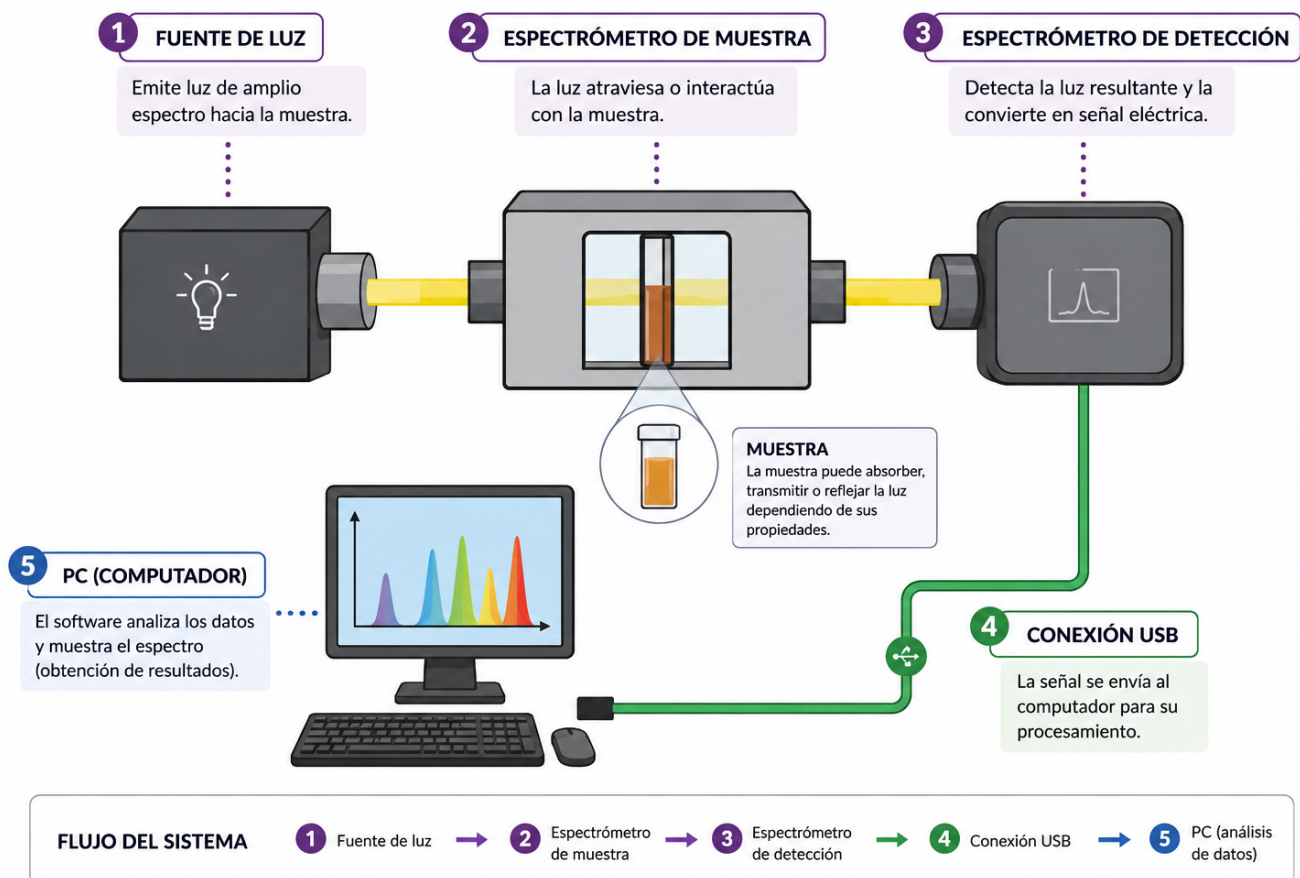


Figura 2.2: Montaje experimental para medir el espectro de absorción de las muestras sintetizadas. Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la figura anterior, el montaje experimental para realizar las medidas de Absorbancia estará compuesto por una fuente de luz continua (200-2000 nm) de tungsteno-deuterio (DT-MINI-2GS), fibras ópticas, un porta muestra en el que se colocarán cubetas de cuarzo que a su vez contendrán los QDs de CdS, un

espectrógrafo USB4000-UV-VIS, un cable USB y una computadora (PC) en la cual se guardarán los espectros obtenidos por medio del Software SpectraSuite de Ocean Optics.

2.4. Fabricación de películas delgadas

Las películas delgadas serán depositadas en sustratos de borosilicato para poder analizarlas ópticamente y sobre sustratos de papel aluminio comercial para poder analizarlas estructuralmente. La deposición se realiza mediante un recubridor por giro, conocido como *spin coater*. El proceso de deposición se efectúa de la siguiente manera:

- A. Se coloca la disolución sobre el sustrato limpio en el *spin coater*.
- B. Se hace funcionar el dispositivo a bajas velocidades para que la disolución pueda esparcirse por todo el sustrato.
- C. Se deja girar durante el tiempo pertinente a alta velocidad, de manera que por acción de la fuerza centrífuga se forme la película delgada sobre el sustrato.
- D. Finalmente, se realiza un proceso térmico de curado para evaporar el solvente. Dicho proceso se muestra esquematizado en la Figura 2.3.

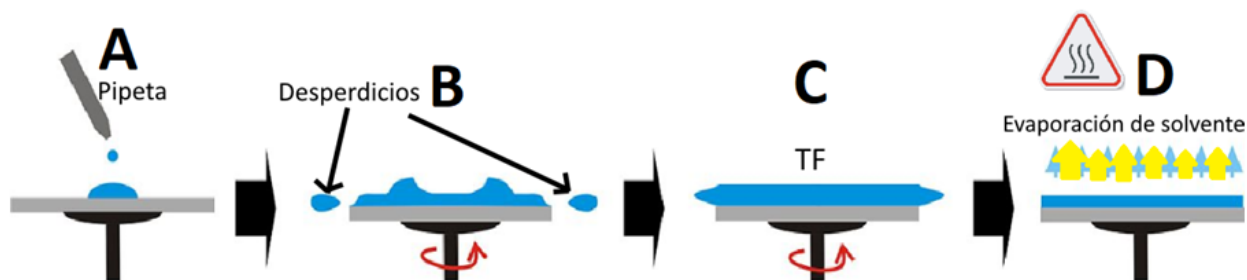


Figura 2.3: Deposición mediante técnica de recubrimiento por giro (spin coating).

2.5. Tratamiento de muestras

Las muestras obtenidas se han etiquetado de la siguiente manera: $\text{TiO}_2(1:1:0.05)$, según la relación que se tenga entre el volumen de agua, etanol y ácido acético de la solución; los puntos cuánticos también etiquetados como GCQDs. y se escribió la fecha que se sintetizaron, en el conjunto de muestras, para evitar confusiones cuando se almacenen en el laboratorio de espectroscopia óptica.

2.6. Caracterización óptica de las películas delgadas.

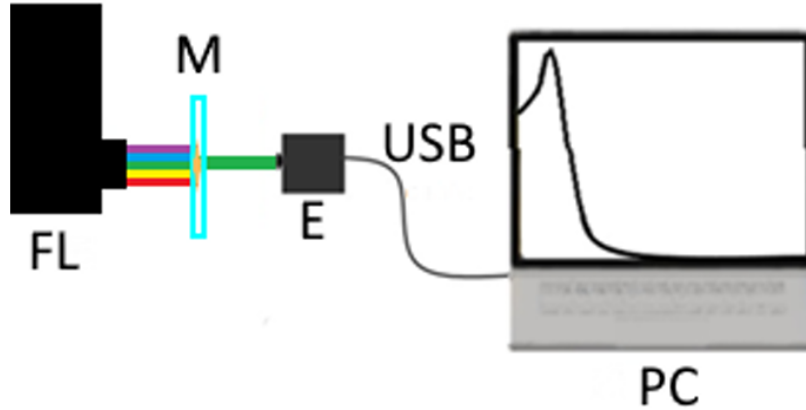


Figura 2.4: Montaje experimental para medir el espectro de absorción de películas delgadas.

Como se observa en la Figura 2.4, el montaje experimental para realizar las medidas de absorbancia estará compuesto por una fuente de luz continua (200–2000 nm) de tungsteno-deuterio (DT-MINI-2-GS) (FL), un soporte con control de posición que sostiene un sustrato de borosilicato con las películas delgadas de los GCQDs y TiO_2 (M) en diversas posiciones, un espectrógrafo USB4000-UV-VIS (E), un cable USB y una computadora (PC) donde se almacenarán los espectros obtenidos mediante el software *SpectraSuite* de Ocean Optics. Cada TF ha sido analizada en diferentes puntos espaciales para estudiar el comportamiento de la homogeneidad estructural de la deposición como se muestra en la figura 2.5

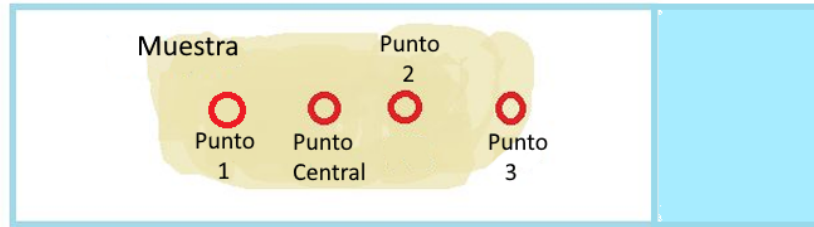


Figura 2.5: Ubicación espacial de los puntos de medición de absorción.

2.7. Caracterización estructural de películas delgadas

La caracterización estructural de las películas delgadas (TF, Thin Films) se realizó mediante un prototipo óptico de bajo costo desarrollado para la determinación puntual del grosor de la película mediante interferometría láser. Este sistema, mostrado esquemáticamente en la Figura 2.7, permite analizar la muestra punto por punto gracias a una plataforma motorizada bidimensional (ejes X–Y) que desplaza la película de manera controlada y automática, posibilitando un barrido completo de la superficie. El diseño y funcionamiento de este prototipo se describen con mayor detalle en el trabajo reportado por Cisneros et al. [44].

El principio de operación del sistema se basa en la interferencia de haces reflejados en las interfaces aire–película y película–sustrato. Las franjas de interferencia obtenidas son registradas por un fotodetector, y el análisis de la periodicidad de dichas franjas permite determinar el grosor local de la película con una resolución micrométrica. Este enfoque ofrece una alternativa accesible y no destructiva frente a técnicas convencionales de caracterización estructural.

Para validar los resultados obtenidos mediante el prototipo de interferencia laser, se empleó microscopía electrónica de barrido (SEM del inglés Scanning Electron Microscopy), técnica que permite una visualización

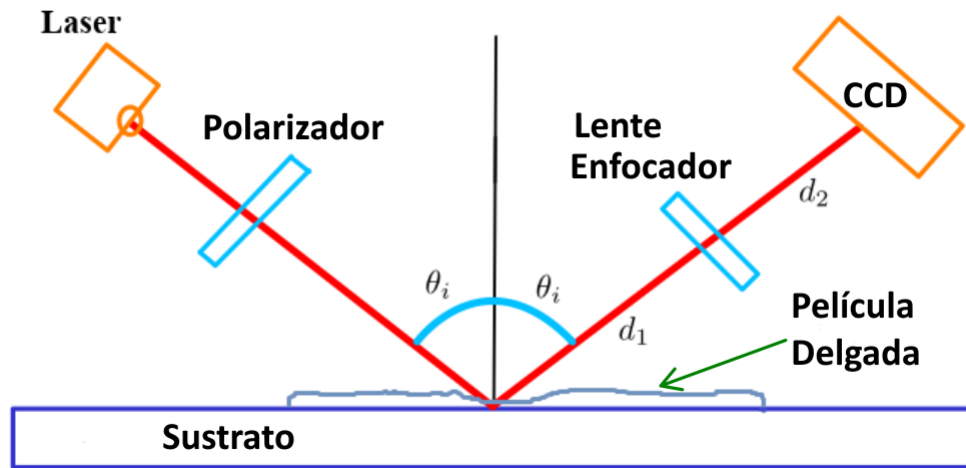


Figura 2.6: Esquema representativo del arreglo óptico del prototipo interferométrico para la medición del grosor de películas delgadas.

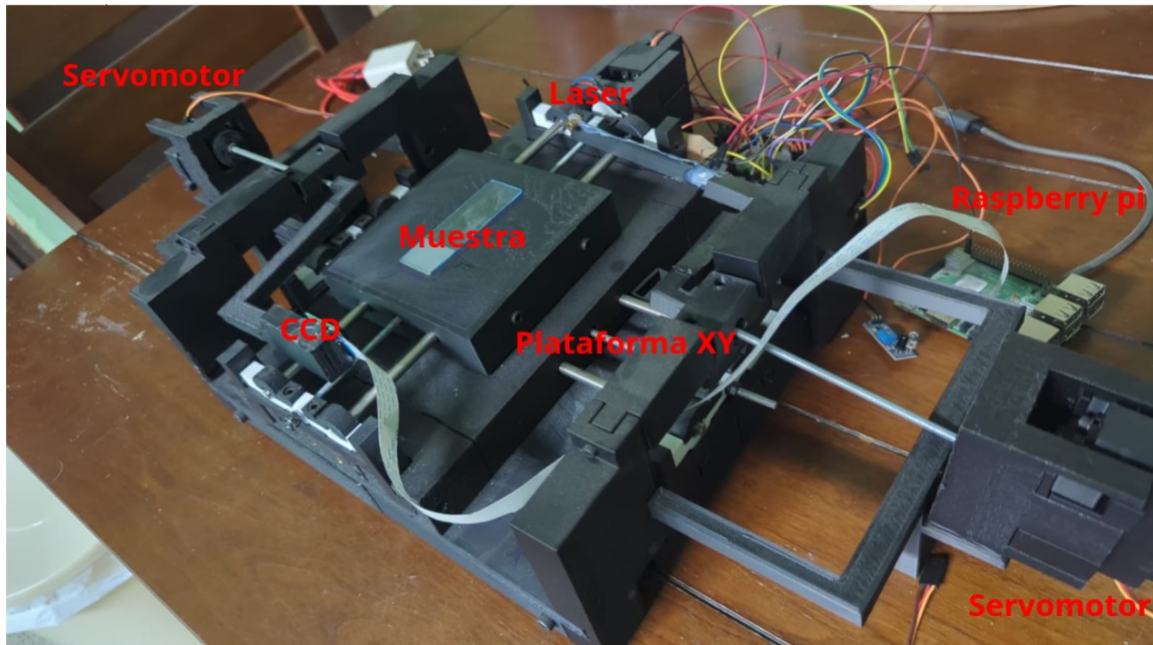


Figura 2.7: Dispositivo LTS para la medición del grosor de películas delgadas.

directa de la sección transversal de la muestra y la determinación precisa las dimensiones de su superficie. Las mediciones se realizaron utilizando un microscopio electrónico TESCAN VEGA-3, con una resolución de 2 nm a 30 kV en condiciones de alto vacío y de 2.5 nm a 30 kV en modo de bajo vacío, equipado además con un detector de luminiscencia catódica (CL) pancromático con un rango espectral de 185–850 nm.

Las muestras, previamente depositadas sobre papel aluminio, se montaron cuidadosamente en la cámara del equipo operando en modo de bajo vacío. Se dispusieron de manera que la película quedara expuesta lateralmente (como se muestra en la figura 2.8), lo que permitió observar con claridad el perfil transversal y realizar mediciones directas del espesor a partir de las imágenes obtenidas por SEM.

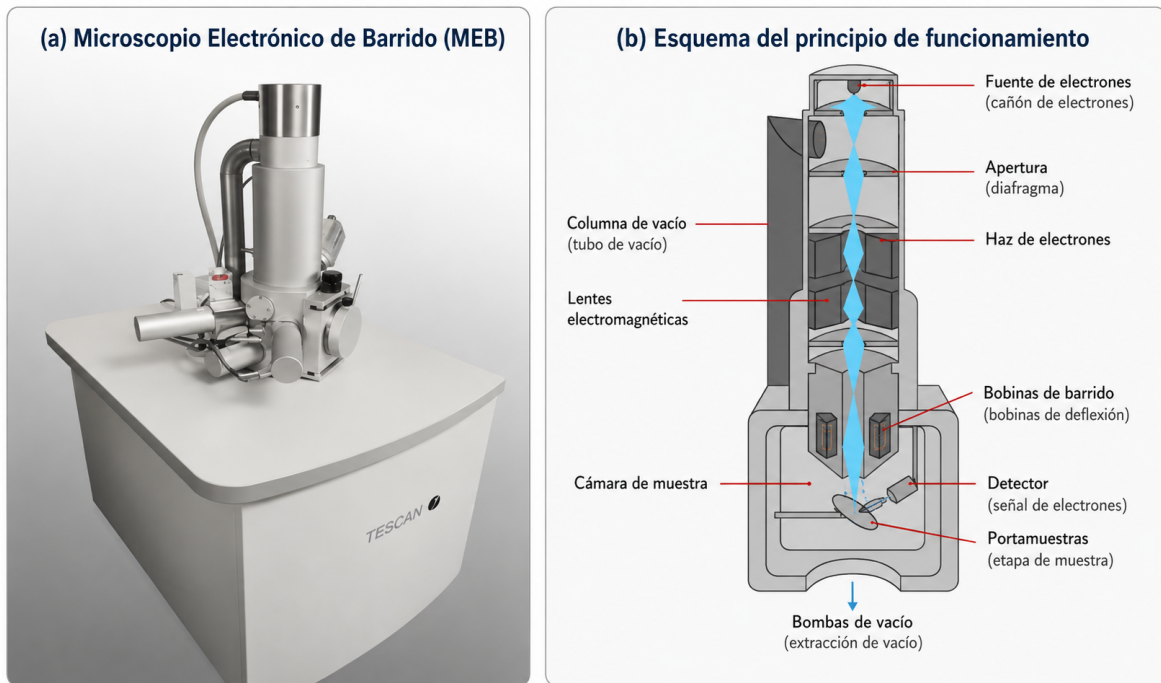


Figura 2.8: a) Microscopio electrónico de barrido TESCAN VEGA-3 utilizado en la caracterización, b) configuración interna representativa del equipo, editado de[45].

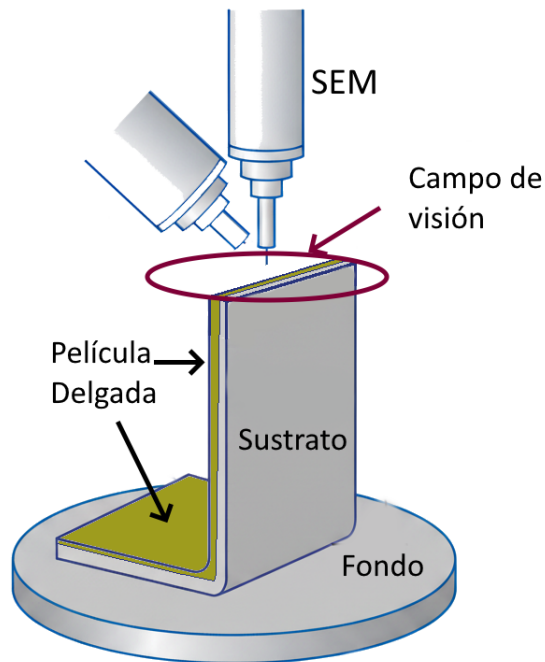


Figura 2.9: Esquema representativo de la obtención del grosor de películas delgadas mediante observación transversal en SEM.

Los valores de espesor determinados por ambas técnicas (interferometría láser y SEM) fueron comparados para evaluar la precisión y reproducibilidad del sistema desarrollado, obteniéndose una concordancia adecuada que valida la eficacia del prototipo como herramienta confiable para el análisis estructural de las TF.

Capítulo 3

Resultados y discusión

3.1. Comportamiento óptico de las soluciones de TiO_2

Antes de analizar las películas delgadas, es necesario considerar el comportamiento óptico de las soluciones precursoras de TiO_2 . Si bien en la metodología se describieron tres relaciones diferentes de preparación, en esta sección se presenta únicamente la solución base ya que entre los espectros tomados de las tres soluciones no se mostró ninguna diferencia apreciable. Dicha solución es utilizada como referencia, ya que permite comparar de manera más clara los cambios inducidos posteriormente por la incorporación de los GCQDs. Esta solución muestra el comportamiento característico del TiO_2 en medio alcohólico-acuoso estabilizado con ácido acético, lo cual asegura una buena dispersión coloidal y evita la aglomeración de partículas.

En la Figura 3.1 se observa el espectro de absorción de la solución de TiO_2 . El máximo de absorción en la región ultravioleta coincide con la transición electrónica asociada a la brecha energética del TiO_2 , lo que sirve como punto de comparación para estudiar las modificaciones espectrales que aparecen cuando el material se mezcla con diferentes concentraciones de puntos cuánticos de grafeno.

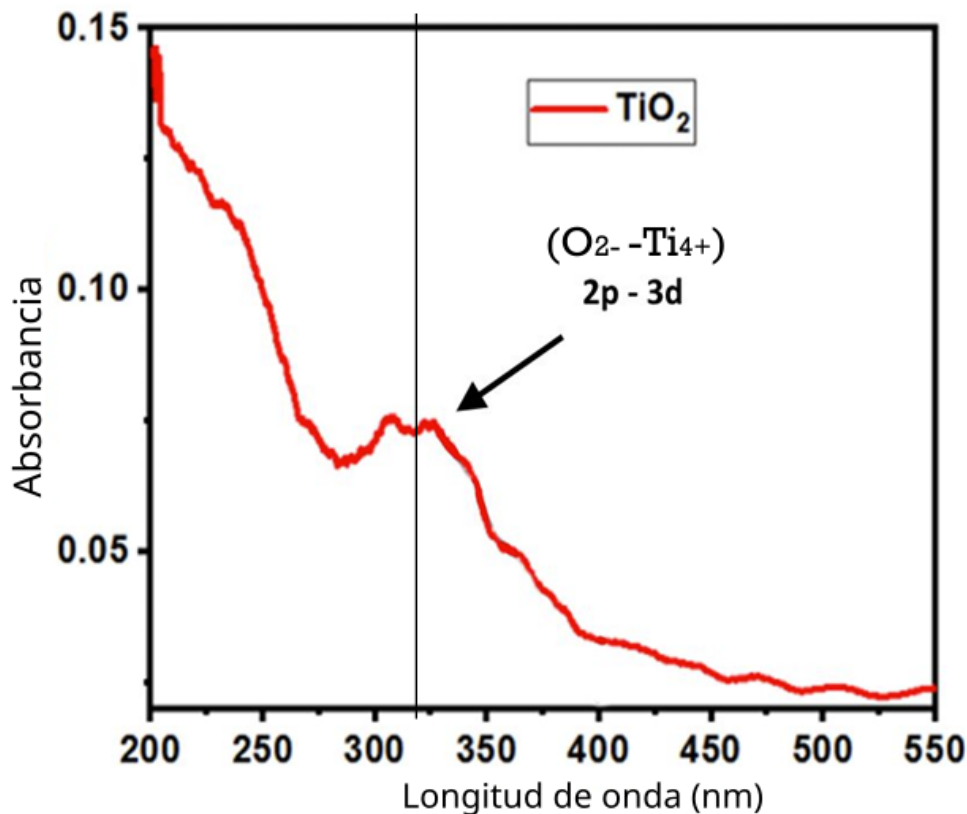


Figura 3.1: Espectro de absorción de la solución base de TiO₂.

3.2. Síntesis de puntos cuánticos de grafeno

Durante la síntesis, la solución inicial de ácido cítrico (AC) presentó un aspecto completamente traslúcido, lo cual se esperaba dado que el precursor no posee dominios conjugados capaces de absorber en la región visible. Una vez iniciada la pirólisis y alcanzados los 200°C, la solución permaneció sin cambios aparentes durante los primeros 5 minutos. Posteriormente, se observó una transición clara hacia un color amarillo tenue. Este cambio cromático constituye la primera evidencia experimental de la formación de estructuras aromáticas y pequeños dominios carbonosos durante la deshidratación y condensación térmica del precursor [46].

A medida que el tiempo de pirólisis aumentó, el color de la mezcla progresó de amarillo claro a un tono más intenso y finalmente a marrón. Esta evolución visual indica un incremento continuo en el grado de carbonización y en el desarrollo de dominios conjugados tipo sp², característicos de los puntos cuánticos de grafeno (GCQDs). En esta etapa final se extrajo la muestra para su posterior caracterización.

El comportamiento observado coincide con reportes previos en síntesis por pirólisis de carbohidratos, donde la aparición de tonalidades amarillas y marrones se asocia directamente con la formación de nanodominios carbonosos y grupos funcionales oxigenados en la superficie. Por lo tanto, las variaciones de color registradas durante el proceso constituyen un primer indicador experimental de que la formación de GCQDs tuvo lugar de manera progresiva a lo largo del tratamiento térmico.

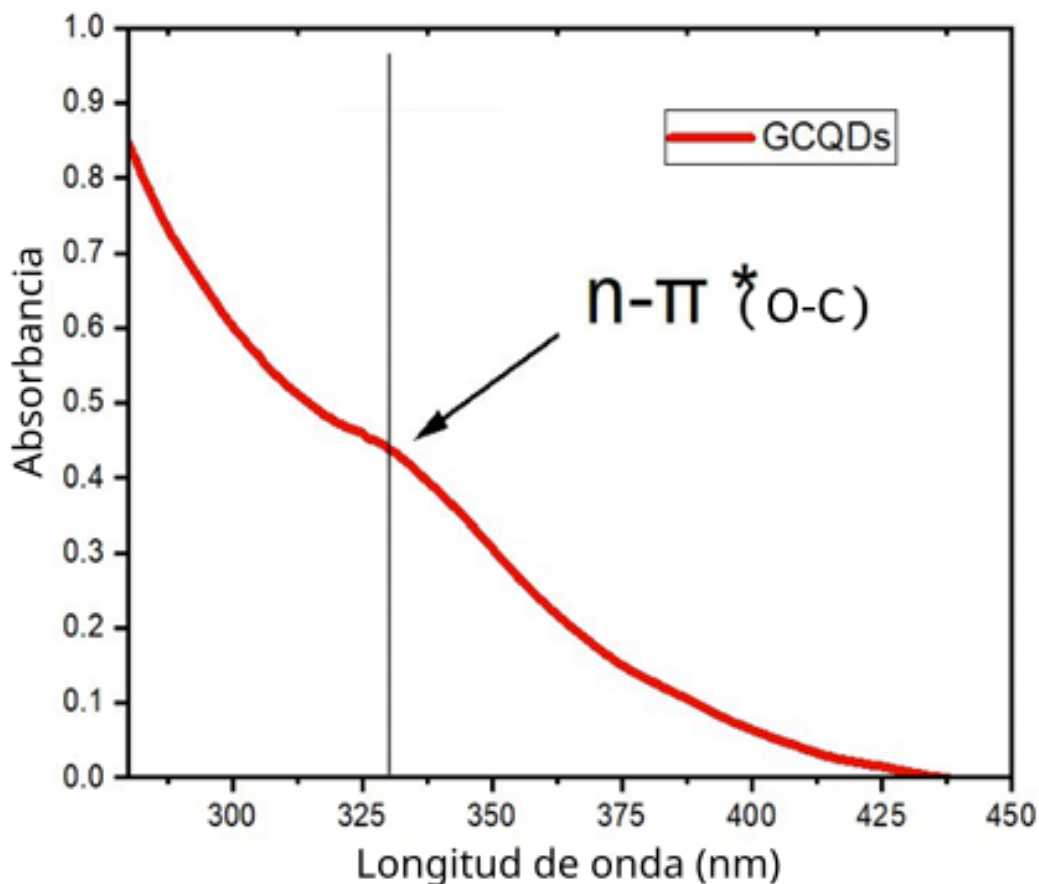


Figura 3.2: Espectro de absorción de puntos cuánticos de grafeno en solución coloidal.

3.3. Comportamiento óptico de muestras de películas delgadas TiO_2

Se depositaron películas delgadas de TiO_2 , logrando identificar la banda característica del TiO_2 con un máximo centrado en **325 nm**, utilizando una velocidad de rotación de 4 kRPM durante el proceso de *spin-coating*. Manteniendo fija la velocidad de giro, se modificó el ratio entre los volúmenes de etanol y agua en la solución precursora del TiO_2 . Se ha reportado que el etanol absoluto actúa como redispersante principal, lo que resultó clave por su volatilidad para obtener una película delgada homogénea durante el proceso de deposición por *spin-coating*. Por su parte, el agua destilada ayudó a controlar la polaridad general del sistema y a modular la velocidad de evaporación del solvente. Finalmente, el ácido acético desempeñó un papel importante en evitar que las partículas suspendidas se aglomeren y sedimenten.

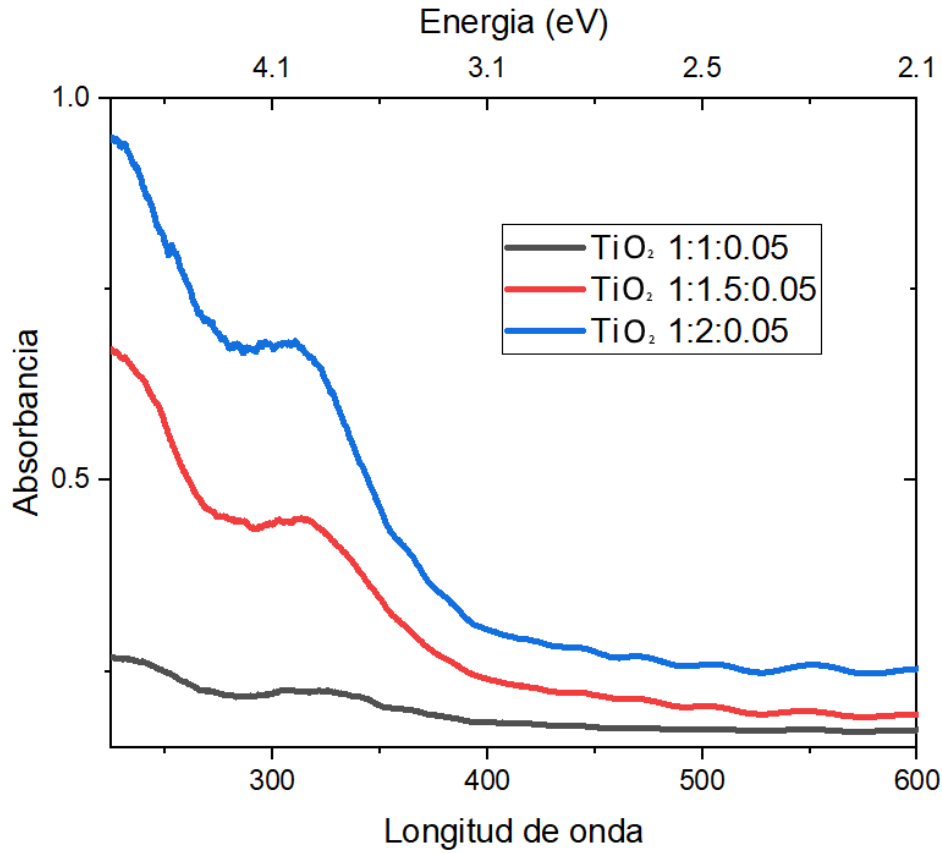


Figura 3.3: Espectro de absorción de película delgada de la solución de dióxido de titanio variando los volúmenes de alcohol y agua.

Como se observa en la Figura 3.3, todas las muestras presentan la banda característica del TiO_2 , con un máximo centrado en **325 nm**. No obstante, la intensidad y definición de esta banda dependen fuertemente de la composición del solvente precursor:

- La solución con el ratio **1:2:0.05** mostró la mayor definición y la mayor absorción en la banda alrededor de 325 nm, indicando una interacción más eficiente de la luz con la película.
- Un incremento en la proporción de etanol favoreció la formación de películas más homogéneas y con menor presencia de defectos superficiales.

La homogeneidad de las películas delgadas constituye un factor determinante en su absorción, debido a que la presencia de poros, microagregados o irregularidades cuya escala es comparable con la longitud de onda incidente provoca dispersión óptica, afectando la absorción efectiva registrada. En este sentido, la solución con ratio **1:2:0.05** produjo películas con menor dispersión superficial, lo que explica el incremento observado en la intensidad espectral.

Este comportamiento puede atribuirse directamente a la reología de la solución precursora: el etanol, al actuar como redispersante de baja viscosidad y alta volatilidad, promueve una nivelación uniforme durante el *spin-coating*; mientras que el agua regula simultáneamente la hidrólisis del precursor y la velocidad de evaporación. El ácido acético, por su parte, estabiliza químicamente la suspensión e inhibe la formación de conglomerados, evitando sedimentación prematura del TiO_2 . En conjunto, el ratio óptimo proporcionó un equilibrio adecuado entre viscosidad, tensión superficial y cinética de evaporación, dando lugar a películas de mayor densidad óptica y mejor respuesta espectral [47].

3.4. Comportamiento óptico de muestras de QDs mezclados con TiO_2

Tras determinar el ratio de solventes óptimo para obtener películas delgadas homogéneas de TiO_2 , se procedió a incorporar los puntos cuánticos de carbono (GCQDs) en la matriz del óxido. Para cada condición de deposición se añadieron 10 mL de la solución coloidal de GCQDs al precursor previamente optimizado.

La comparación entre los espectros de las películas dopadas y las películas de TiO_2 puro revela un incremento casi uniforme (horizontal) en la absorbancia en todo el rango espectral. Este comportamiento es consistente con el proceso de incrustamiento de las nanoestructuras de carbono dentro de la matriz del semiconductor, ya que los GCQDs introducen centros dispersores y absorbentes adicionales que modifican la respuesta óptica global de la película.

El incremento homogéneo en la absorbancia sugiere que los GCQDs no generan nuevas bandas estrechas asociadas a defectos localizados, sino que se distribuyen de manera relativamente uniforme, alterando principalmente la densidad óptica efectiva de la película. Esto es coherente con la dispersión cuasi-isotrópica característica de los GCQDs y confirma que el método de deposición optimizado favorece una integración adecuada del material híbrido TiO_2 -GCQDs dentro del espesor de la película.

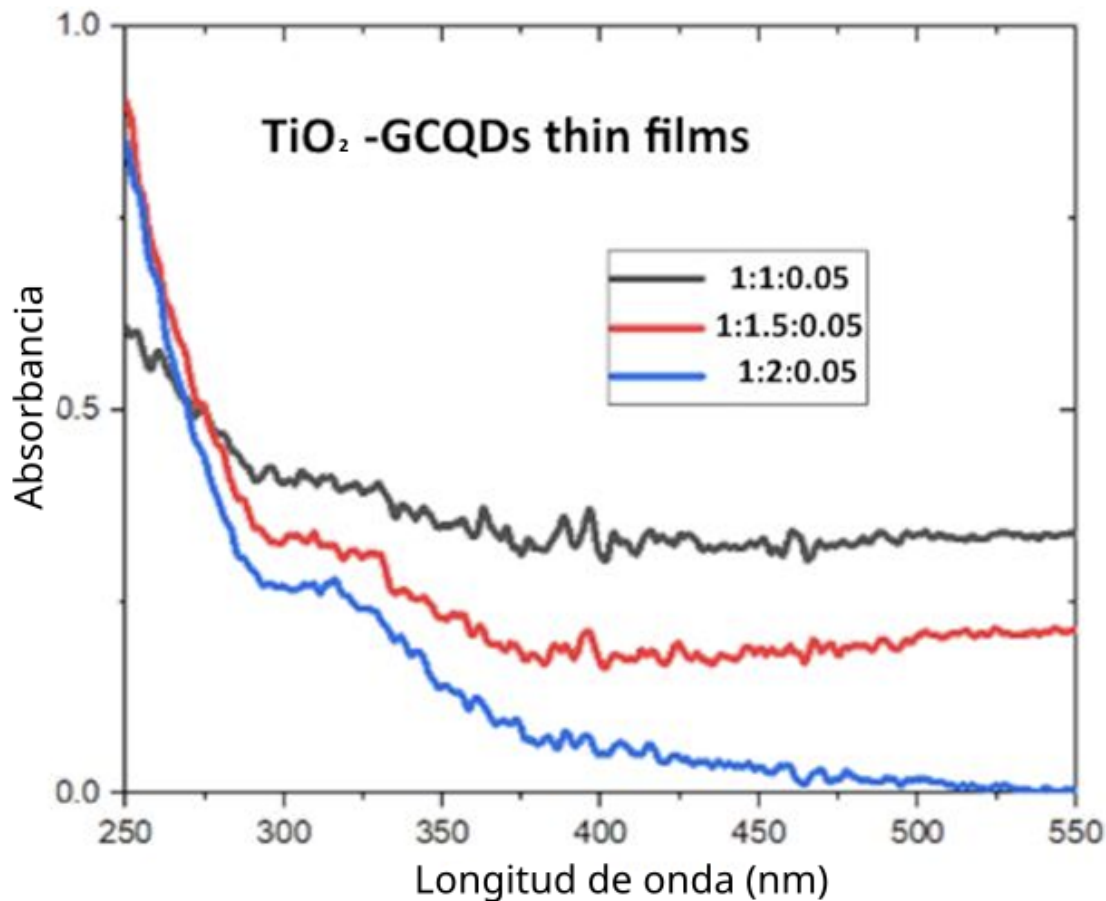


Figura 3.4: Espectro de absorbancia de película delgada de la solución de TiO_2 mezclado con QDs variando los volúmenes de alcohol y agua.

Se llevó a cabo una deconvolución gaussiana del espectro de absorción para estimar la contribución de las distintas fases cristalinas presentes en el TiO_2 . Aunque se esperaba una mayor contribución de la fase anatasa (por ser la predominante en el precursor utilizado), los resultados indicaron una concentración significativa de la fase brookita.

Al incorporar los GCQDs, se observó una disminución en la banda gaussiana atribuida a la fase rutilo, lo que sugiere la existencia de transferencia de carga o acoplamiento electrónico entre esta fase y los GCQDs. Uno de estos mecanismos es la transferencia de carga interfacial (ICT), en la cual los electrones pueden migrar desde los GCQDs hacia el TiO_2 , o viceversa, dependiendo de la alineación de bandas, creando estados intermedios que modifican la absorción óptica. Además, si los niveles de energía están ordenados de manera conveniente, se puede formar una heterounión tipo II, donde los electrones se localizan en el TiO_2 y los huecos en los GCQDs, disminuyendo la energía efectiva de excitación. La introducción de niveles defectuosos o de borde es otro mecanismo relevante, ya que los grupos funcionales presentes en los GCQDs (como $-\text{COOH}$ y $-\text{OH}$) pueden inducir niveles electrónicos intermedios dentro del *gap* del TiO_2 que actúan como trampas electrónicas o centros activos. Finalmente, el acoplamiento $\pi - \pi$ híbrido orbital entre los dominios π -conjugados del grafeno y los orbitales electrónicos del TiO_2 puede generar un acoplamiento efectivo que modifica la densidad de estados del sistema.

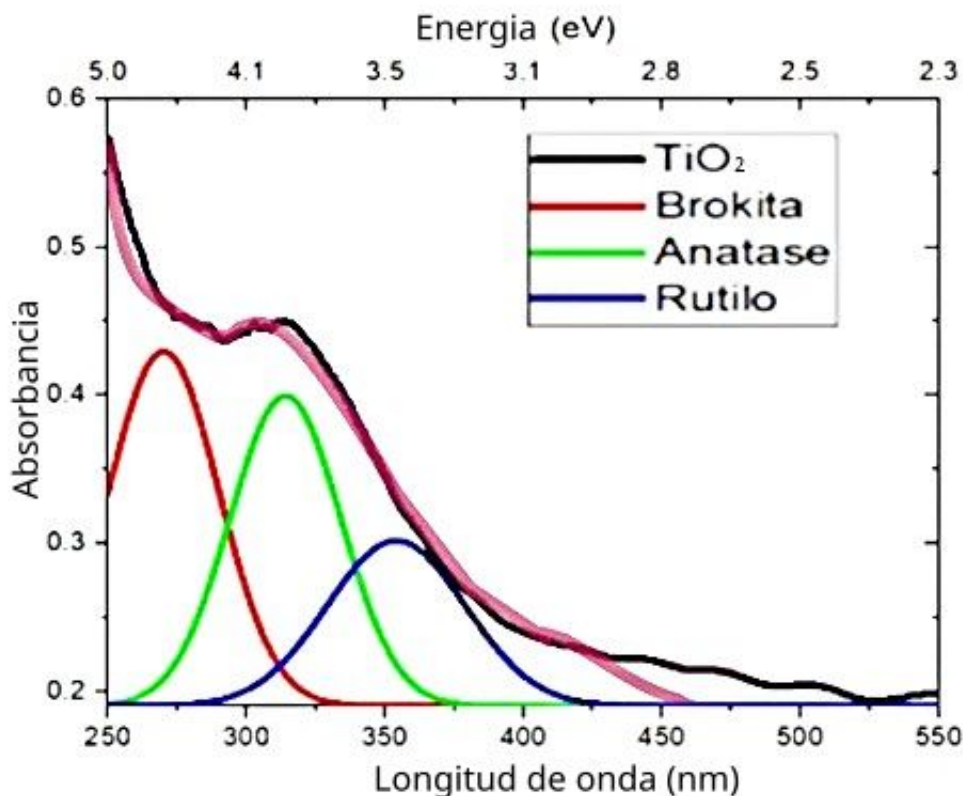


Figura 3.5: Deconvolución gaussiana del espectro de absorción del TiO_2 .

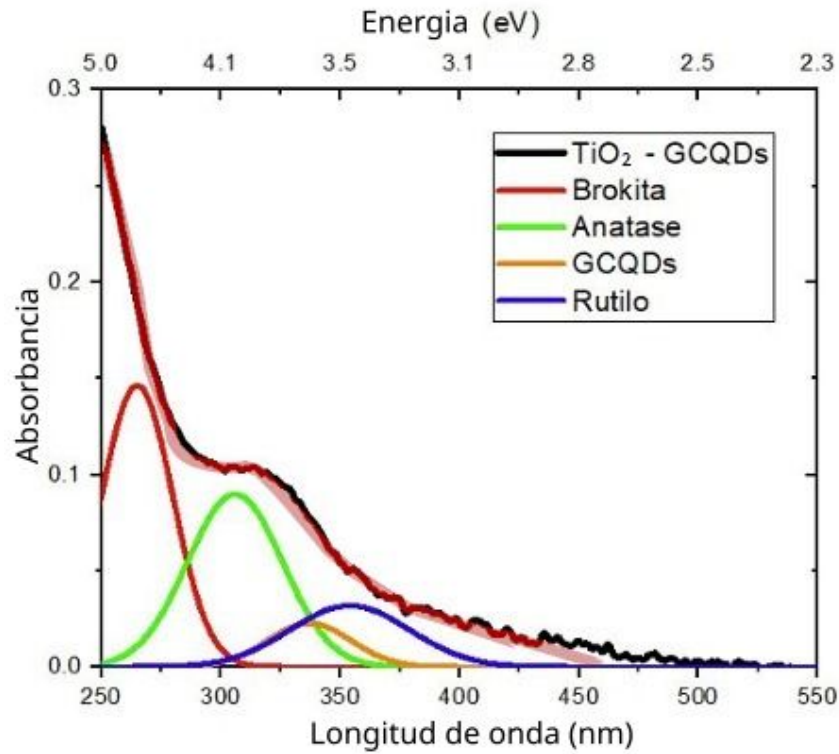


Figura 3.6: Deconvolución gaussiana del espectro TiO_2 +GCQDs.

Se llevó a cabo una deconvolución gaussiana del espectro de absorción para estimar la contribución de las distintas fases cristalinas presentes en el TiO_2 . Aunque se esperaba una mayor contribución de la fase anatasa (por ser la predominante en el precursor utilizado), los resultados indicaron una concentración significativa de la fase brookita.

Al incorporar los GCQDs, se observó una disminución en la banda gaussiana atribuida a la fase rutilo, lo que sugiere la existencia de transferencia de carga o acoplamiento electrónico entre esta fase y los GCQDs. Uno de estos mecanismos es la transferencia de carga interfacial (ICT), en la cual los electrones pueden migrar desde los GCQDs hacia el TiO_2 , o viceversa, dependiendo de la alineación de bandas, creando estados intermedios que modifican la absorción óptica. Además, si los niveles de energía están ordenados de manera conveniente, se puede formar una heterounión tipo II, donde los electrones se localizan en el TiO_2 y los huecos en los GCQDs, disminuyendo la energía efectiva de excitación. La introducción de niveles defectuosos o de borde es otro mecanismo relevante, ya que los grupos funcionales presentes en los GCQDs (como $-\text{COOH}$ y $-\text{OH}$) pueden inducir niveles electrónicos intermedios dentro del *gap* del TiO_2 que actúan como trampas electrónicas o centros activos. Finalmente, el acoplamiento $\pi - \pi$ híbrido orbital entre los dominios π -conjugados del grafeno y los orbitales electrónicos del TiO_2 puede generar un acoplamiento efectivo que modifica la densidad de estados del sistema.

Aunque varias mediciones se realizaron sobre una misma película delgada, se observaron pequeñas diferencias entre los espectros de absorción obtenidos. Este comportamiento es coherente con los resultados presentados en la sección anterior, donde se demostró que la homogeneidad y el grosor influyen directamente en la absorbancia. Debido a que el modelo de absorción utilizado presenta un comportamiento exponencial, incluso variaciones mínimas en el espesor o en la concentración local de GCQDs pueden generar diferencias apreciables en la intensidad del espectro.

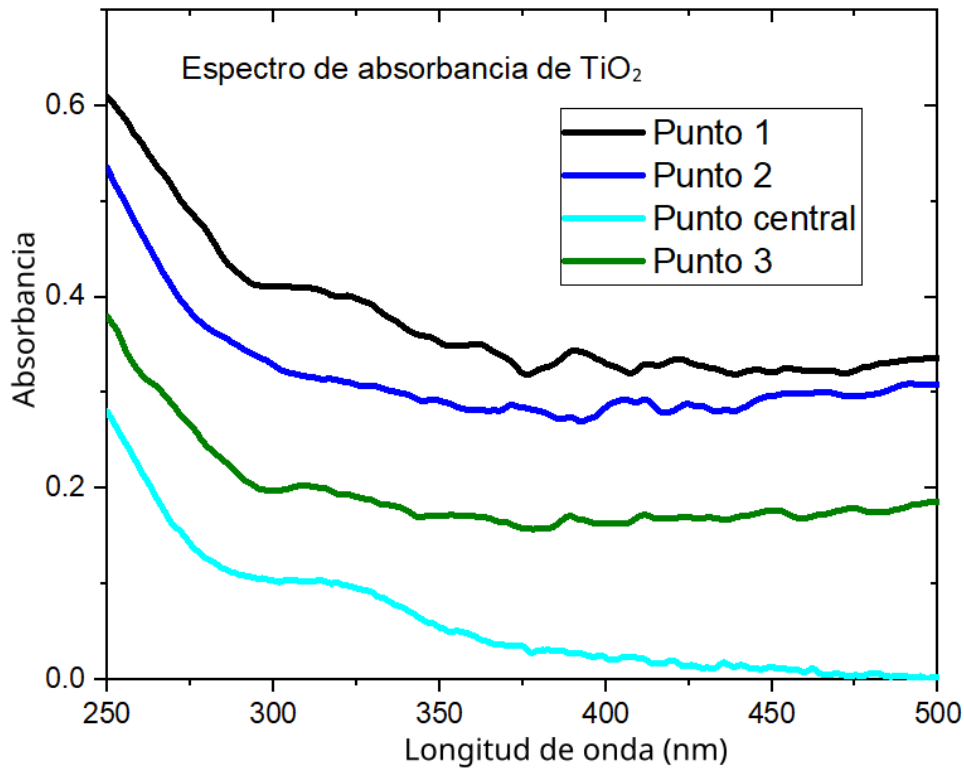


Figura 3.7: Espectros de absorbancia medidos en diferentes puntos espaciales de una película delgada.

3.4.1. Análisis estructural

El sistema LTS se basa en el análisis de patrones de difracción láser generados al incidir luz en la muestra bajo distintos ángulos. A partir de estos patrones, se construye una simulación óptica que se compara con modelos teóricos derivados de las ecuaciones de difracción de Fresnel, dejando como variables libres el grosor de la muestra y su índice de refracción. Al ajustar estos parámetros para lograr la mejor coincidencia entre el patrón experimental y la simulación, se obtiene una estimación precisa del grosor de la muestra.

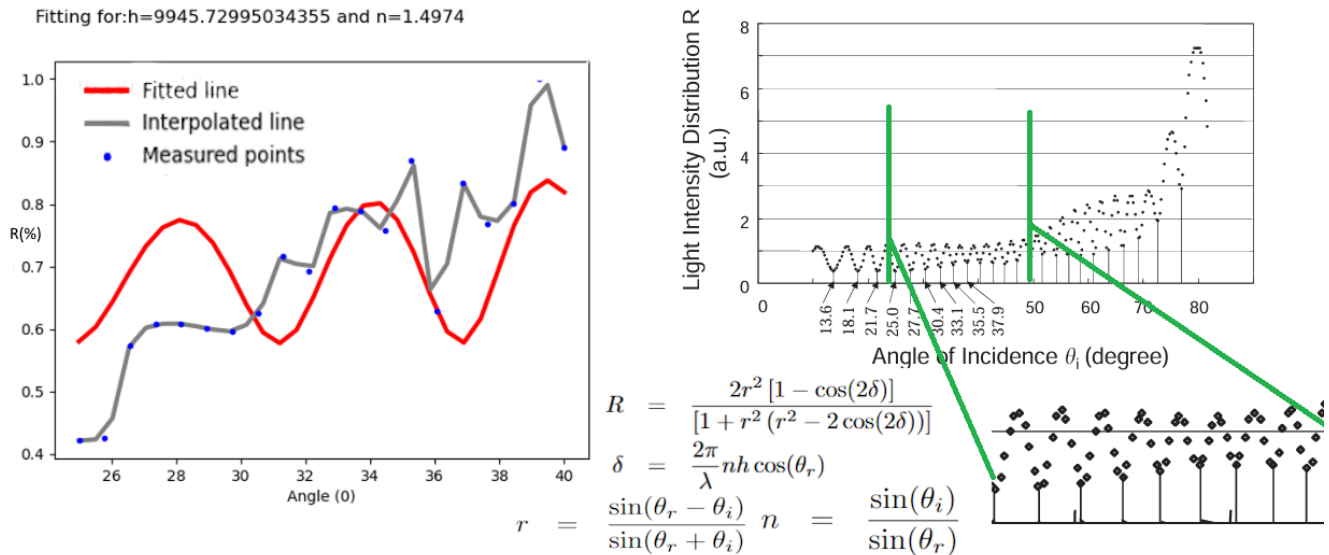


Figura 3.8: Ajuste no lineal de medidas de interferencia láser.

Los resultados de grosor obtenidos mediante el sistema LTS mostraron variaciones entre las diferentes películas analizadas. Estas diferencias en el espesor y en la estructura superficial sugieren que las variaciones observadas en los espectros de absorbancia no se deben únicamente a la composición química del material, sino también a las propiedades estructurales generadas durante el proceso de deposición. En particular, la uniformidad, las fluctuaciones locales de grosor y las zonas con distinta densidad óptica influyen directamente en la intensidad y la forma de las bandas de absorción. Por lo tanto, la correlación entre el grosor medido por el LTS y la respuesta espectral indica que la microestructura de la película delgada desempeña un papel determinante en su comportamiento óptico.

En conjunto, el incremento uniforme de la absorbancia y la estabilidad del grosor medido indican que la dispersión de los GCQDs es eficaz y que las diferencias observadas responden principalmente a modificaciones en la densidad óptica producidas por las nanoestructuras, más que a defectos o irregularidades en la morfología superficial. Estos resultados validan la incorporación controlada de GCQDs en películas delgadas de TiO_2 como un paso clave para el desarrollo de materiales híbridos con respuesta óptica ajustada.

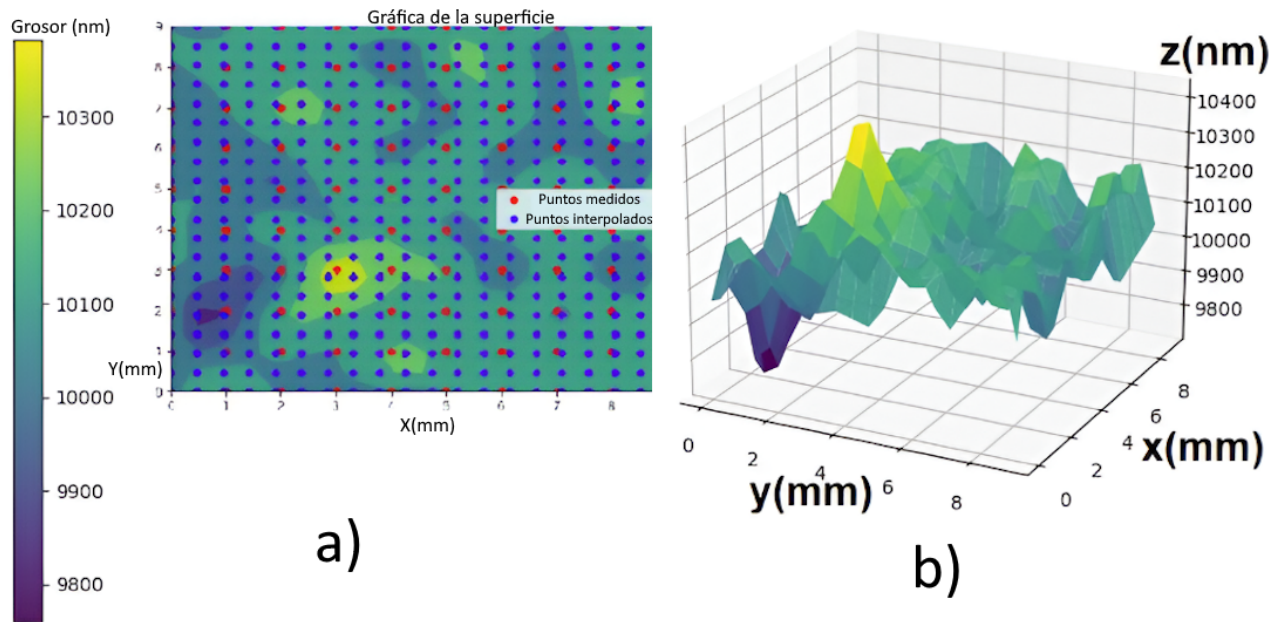


Figura 3.9: Medición del grosor de la película delgada en diferentes puntos espaciales.

Para validar los resultados obtenidos mediante el prototipo LTS, se realizaron mediciones con microscopía electrónica de barrido (SEM), a partir de las cuales fue posible estimar un grosor promedio de aproximadamente $10 \mu\text{m}$ en vista lateral. Esta estimación es consistente con las mediciones realizadas por el sistema LTS, lo que permite validar su fiabilidad y considerarlo una alternativa más económica respecto a técnicas convencionales como SEM.

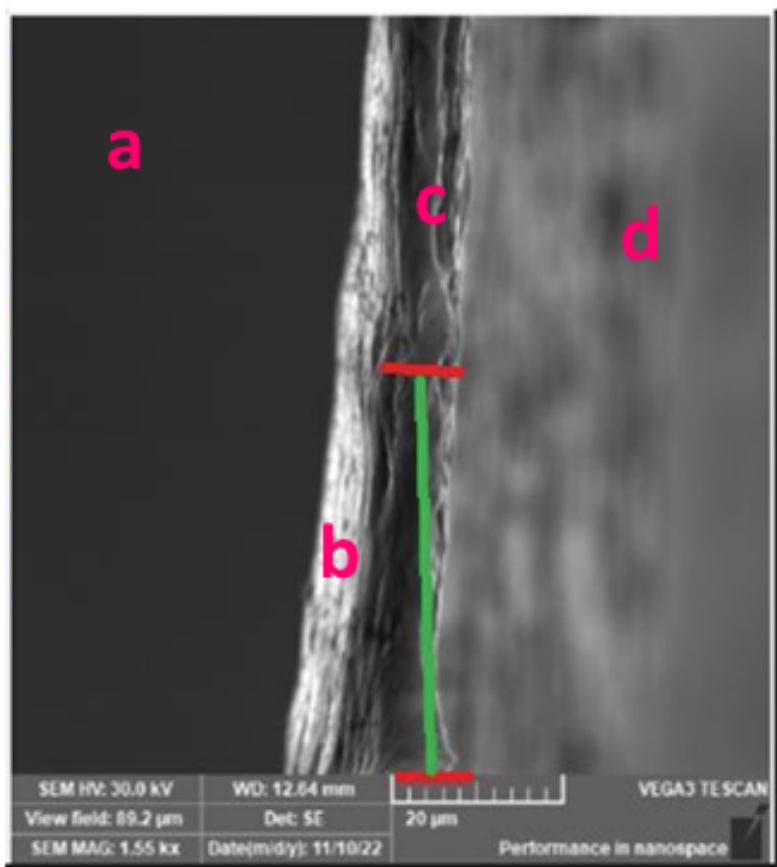


Figura 3.10: Imagen SEM de una película delgada de TiO_2 .

Capítulo 4

Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

A partir del desarrollo de este trabajo de investigación, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1. Se logró sintetizar puntos cuánticos de grafeno (GCQDs) mediante un método sencillo y de bajo costo basado en la pirólisis controlada de ácido cítrico, confirmando la formación de nanomateriales ópticamente activos.
2. La técnica de recubrimiento por giro (*spin coating*) demostró ser un método eficiente y de bajo costo para la fabricación de películas delgadas de TiO_2 y de sistemas híbridos TiO_2 -GCQDs sobre sustratos de vidrio y aluminio, obteniéndose espesores del orden de decenas de micrómetros y validando la viabilidad de

emplear procedimientos accesibles para la síntesis, deposición y caracterización de materiales fotoactivos en entornos de investigación con recursos limitados.

3. Los espectros de absorción obtenidos para las películas de TiO_2 mostraron contribuciones de las fases anatasa, rutilo y brookita, siendo la anatasa la predominante. Al incorporar GCQDs se observó una modificación de las bandas de absorción, atribuida a la interacción interfacial y a la transferencia de carga entre ambos materiales.
4. El sistema de interferometría láser diseñado permitió estimar el grosor de las películas delgadas, obteniéndose resultados consistentes con los medidos mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), validando su uso.

4.2. Recomendaciones

Con base en los resultados y conclusiones alcanzadas, se plantean las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

1. Optimizar la proporción de alcohol, agua y ácido acético en la preparación de las soluciones precursoras de TiO_2 , con el fin de mejorar la homogeneidad y reproducibilidad de las películas.
2. Explorar la variación de parámetros en la síntesis de GCQDs (tiempo, temperatura, pH) para ajustar su emisión y absorción óptica a aplicaciones específicas.
3. Complementar las técnicas de caracterización utilizadas con métodos adicionales como espectroscopía de fotoluminiscencia, difracción de rayos X (XRD) y espectroscopía Raman, para obtener información estructural más detallada.
4. Implementar técnicas de deposición alternativas (como *doctor-blading* o *dip-coating*) para comparar la morfología y propiedades ópticas de las películas.
5. Evaluar la aplicación de las películas TiO_2 -GCQDs en dispositivos optoelectrónicos y fotocatalíticos, como sensores o celdas solares de tercera generación.

Bibliografía

- [1] Kazuya Nakata y Akira Fujishima. “ TiO_2 photocatalysis: Design and applications”. En: *J. Photochem. Photobiol. C* 13.3 (2012), págs. 169-189. ISSN: 1389-5567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2012.06.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389556712000421>.
- [2] A. Fujishima y K. Honda. “Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode”. En: *Nature* 238 (1972), págs. 37-38. DOI: 10.1038/23837.
- [3] D. L. Carp y M. R. S. A. B. Grätzel. “Photocatalytic water splitting in the presence of a sacrificial agent”. En: *J. Photochem. Photobiol. A* 163.1 (2004), págs. 1-10. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2004.01.002.

- [4] U. Diebold. "The surface science of titanium dioxide". En: *Surf. Sci. Rep.* 48 (2003), págs. 53-229. DOI: 10.1016/S0167-5729(03)00003-3.
- [5] N. Velasco Martínez. "Estudio de las propiedades estructurales, ópticas y superficiales de TiO₂ parcialmente reducido". Tesis de licenciatura. Tesis doct. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2023. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12371/19053>.
- [6] T. Luttrell y K. C. Smith. "Electrochemical and photocatalytic properties of TiO₂-based materials". En: *J. Electrochem. Soc.* 162.4 (2015), págs. 196-202. DOI: 10.1149/2.0221504jes.
- [7] X. Wang y L. Zhang. "Titanium Dioxide Photocatalysis: Recent Advances and Future Perspectives". En: *Chemical Reviews* 106.4 (2006), págs. 1250-1278. DOI: 10.1021/cr050226r.
- [8] J. Zhang y T. M. L. Wiggington. "The interaction of water with TiO₂ surfaces". En: *Surface Science* 462.1-3 (2000), págs. 1-17. DOI: 10.1016/S0039-6028(00)00356-9.
- [9] M. Chen y P. W. Stephens. "Novel approaches to the photocatalytic decomposition of water". En: *Energy Environ. Sci.* 1 (2007), págs. 104-112. DOI: 10.1039/B609249A.
- [10] K. S. Novoselov y A. K. Geim. "Electric field effect in atomically thin carbon films". En: *Science* 306 (2004), págs. 666-669. DOI: 10.1126/science.1102896.
- [11] Andre Konstantin Geim. "Graphene: Status and Prospects". En: *Science* 324.5934 (2009), págs. 1530-1534.
- [12] E. D. Castro y J. M. Slaughter. "Graphene quantum dots for photonic devices". En: *Adv. Funct. Mater.* 19 (2009), págs. 2896-2902. DOI: 10.1002/adfm.200801211.
- [13] Changgu Lee et al. "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene". En: *Science* 321.5887 (2008), págs. 385-388. DOI: 10.1126/science.1157996.
- [14] S. Park y R. S. Ruoff. "Chemical methods for the production of graphenes". En: *Nat. Nanotechnol.* 4.5 (2009), págs. 217-224. DOI: 10.1038/nnano.2009.48.
- [15] K. I. Bolotin y L. S. Levitov. "Graphene transport properties". En: *Nature* 456 (2008), págs. 107-110. DOI: 10.1038/nature07372.
- [16] R. R. Nair y P. Blake. "Fine structure constant defines visual transparency of graphene". En: *Science* 320 (2008), pág. 1308. DOI: 10.1126/science.1156965.
- [17] Z. Zhang y X. Yang. "Graphene oxide based electrodes for supercapacitors". En: *J. Power Sources* 194 (2009), págs. 937-944. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.11.056.
- [18] W. Zhu y Q. Zhang. "Carbon nanotube-based supercapacitors for high power and energy density". En: *Nano Letters* 10 (2010), págs. 4539-4545. DOI: 10.1021/nl1023602.
- [19] A. H. Castro Neto et al. "The electronic properties of graphene". En: *Rev. Mod. Phys.* 81.1 (2009), págs. 109-162. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.109>.
- [20] D. S. L. Abergel, A. Russell y V. I. Fal'ko. "Properties of graphene: a theoretical perspective". En: *Adv. Phys.* 59.4 (2010), págs. 261-482. DOI: <https://doi.org/10.1080/00018732.2010.487978>.
- [21] Y. P. Sun et al. "Quantum-sized carbon dots for bright and colorful photoluminescence". En: *J. Am. Chem. Soc.* 128.24 (2013), págs. 7756-7757. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja062677d>.
- [22] M. Stavrou y A. D. Yablonovitch. "Direct band gap in graphene quantum dots". En: *Nat. Phys.* 11.5 (2015), págs. 399-405. DOI: 10.1038/nphys3287.
- [23] C. Sinclair y D. Callaghan. "The properties of graphene oxide". En: *Nano Letters* 9 (2009), págs. 2182-2187. DOI: 10.1021/nl900303n.
- [24] J. Chen y J. Xu. "Graphene quantum dots: Synthesis and applications". En: *Nat. Commun.* 3 (2012), pág. 748. DOI: 10.1038/ncomms1753.

- [25] B. Coe y R. Huang. “Design and applications of carbon-based quantum dots”. En: *Carbon* 50 (2012), págs. 2403-2410. DOI: 10.1016/j.carbon.2011.12.039.
- [26] J. Mo y R. T. Yang. “Carbon quantum dots for environmental remediation”. En: *J. Hazard. Mater.* 269 (2014), págs. 124-131. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.01.021.
- [27] Sandra Alvarenga et al. “Changes on the stokes shift in large cdse colloidal quantum dots by a ligand exchange”. En: *International Conference of Theoretical and Applied Nanoscience and Nanotechnology: proceedings*. 2018. DOI: 10.11159/tann18.140.
- [28] A. Alvarenga y G. Guedes. “Quantum dots for energy and environmental applications”. En: *Energy Environ. Sci.* 11 (2018), págs. 563-579. DOI: 10.1039/C7EE02668B.
- [29] R. Vilas y G. T. A. Silva. “Photocatalytic performance of quantum dots in environmental applications”. En: *Environ. Sci. Technol.* 49 (2015), págs. 410-417. DOI: 10.1021/es505418p.
- [30] Yu Zou, Dongsheng Li y Deren Yang. “Noninjection synthesis of CdS and alloyed CdS x Se 1- x nanocrystals without nucleation initiators”. En: *Nanoscale Res. Lett.* 5 (2010), págs. 966-971. DOI: 10.1007/s11671-010-9593-2.
- [31] EL Ayuk, MO Ugwu y Samuel B Aronimo. “A review on synthetic methods of nanostructured materials”. En: *Chem. Res. J.* 2.5 (2017), págs. 97-123. URL: <http://eprints.gouni.edu.ng/id/eprint/1251>.
- [32] Tiago Siqueira et al. “Evaluation of the influence of surface treatment on mechanical properties of gas diffusion layer for PEMFC.” En: jul. de 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/235978339_Evaluation_of_the_influence_of_surface_treatment_on_mechanical_properties_of_gas_diffusion_layer_for_PEMFC/download.
- [33] L. Sim, Voo Tin Vui Richard y Mariatti Jaafar. “Properties of epoxy nanocomposite thin films prepared by spin coating technique”. En: *J. Plast. Film Sheeting* 27 (sep. de 2011), págs. 331 -346. DOI: 10.1177/8756087911419745.
- [34] Andre K Geim y Konstantin S Novoselov. “The rise of graphene”. En: *Nat. Mater.* 6.3 (2007), págs. 183-191. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat1849>.
- [35] Kostya S Novoselov et al. “Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene”. En: *Nature* 438.7065 (2005), págs. 197-200. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature04233>.
- [36] Jorge Cuadra, Hamilton Ponce y Carlos Rudamas. “Optical Properties of Graphene Carbon Quantum Dots for Solar Cells Applications”. En: *IEEE CONCAPAN XXXVIII*. 2018, págs. 1-5. DOI: 10.1109/CONCAPAN.2018.8596611.
- [37] Xu Chen et al. “Ti3C2 MXene quantum dots/TiO2 inverse opal heterojunction electrode platform for superior photoelectrochemical biosensing”. En: *Sens. Actuators B Chem.* 289 (2019), págs. 131-137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.03.052>.
- [38] Samantha Wijewardane y Lawrence L. Kazmerski. “Inventions, innovations, and new technologies: Flexible and lightweight thin-film solar PV based on CIGS, CdTe, and a-Si:H”. En: *Solar Compass* 7 (2023), pág. 100053. ISSN: 2772-9400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2023.100053>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772940023000218>.
- [39] Runwei Mo et al. “Facile synthesis of anatase TiO2 quantum-dot/graphene-nanosheet composites with enhanced electrochemical performance for lithium-ion batteries”. En: *Advanced materials* 26.13 (2014), págs. 2084-2088. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201304338>.
- [40] C Leyva-Porras et al. “Low-temperature synthesis and characterization of anatase TiO2 nanoparticles by an acid assisted sol-gel method”. En: *J. Alloys Compd.* 647 (2015), págs. 627-636. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.041>.

- [41] L. M. Goncalves et al. "Optimization of thermoelectric properties on Bi₂Te₃ thin films deposited by thermal co-evaporation". En: *Thin Solid Films* 518.10 (2010), págs. 2816-2821. ISSN: 0040-6090. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.08.038.
- [42] J. Cuadra. "Tesis de licenciatura: Estudio de las propiedades opticas de puntos cuanticos de carbono grafeno". En: (2020). URL: <https://repositorio.ues.edu.sv/items/4d03e7f8-2394-46ca-a771-111ded12fa2f>.
- [43] H. Wang y X. Zhang. "Graphene Oxide Quantum Dots for Sensing Applications". En: *ACS Sensors* 5 (2015), págs. 118-1310. DOI: 10.1021/acssensors.5b00385.
- [44] Nelson Cisneros, Jorge Cuadra y Carlos Rudamas. "Development of a Low-Cost Surface Characterization Prototype for Solid and Liquid Samples". En: *CONCAPAN XLIII*. 2025, págs. 1-5. DOI: 10.1109/CONCAPAN66820.2025.11512611.
- [45] Omar Adnan. "Electroluminescence of White Light from ZnO Nanostructures/TPD Hybrid". Tesis doct. Ago. de 2015. DOI: 10.13140/RG.2.2.25395.48163.
- [46] Marta J Krysmann et al. "Formation mechanism of carbogenic nanoparticles with dual photoluminescence emission". En: *J. Am. Chem. Soc.* 134.2 (2012), págs. 747-750. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja204661r>.
- [47] C Jeffrey Brinker y George W Scherer. *Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing*. Gulf Professional Publishing, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-22386-5>.

Anexos

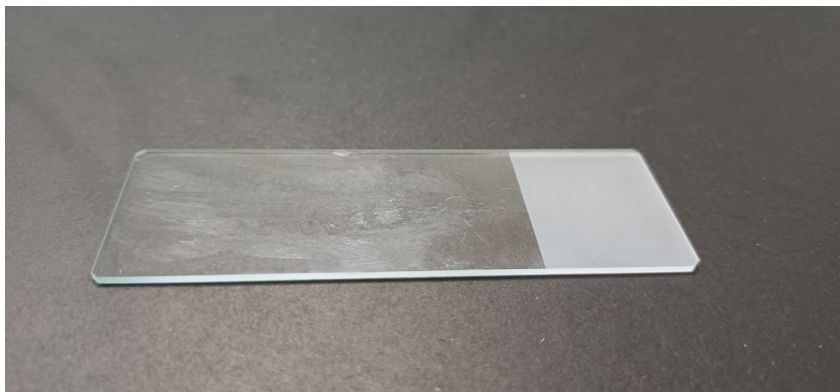


Figura 4.1: Fotografía de película delgada de TiO_2 depositada sobre un sustrato de Borosilicato.

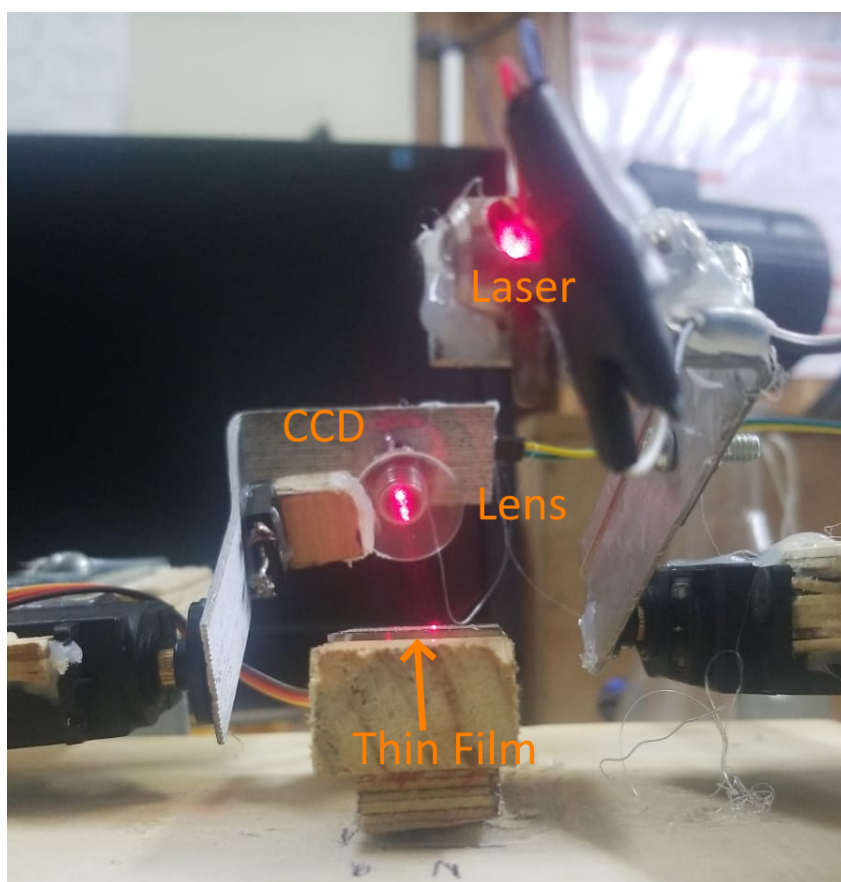


Figura 4.2: Fotografía de la primer versión del prototipo de medición mediante interferencia laser desarrollado durante el presente trabajo.

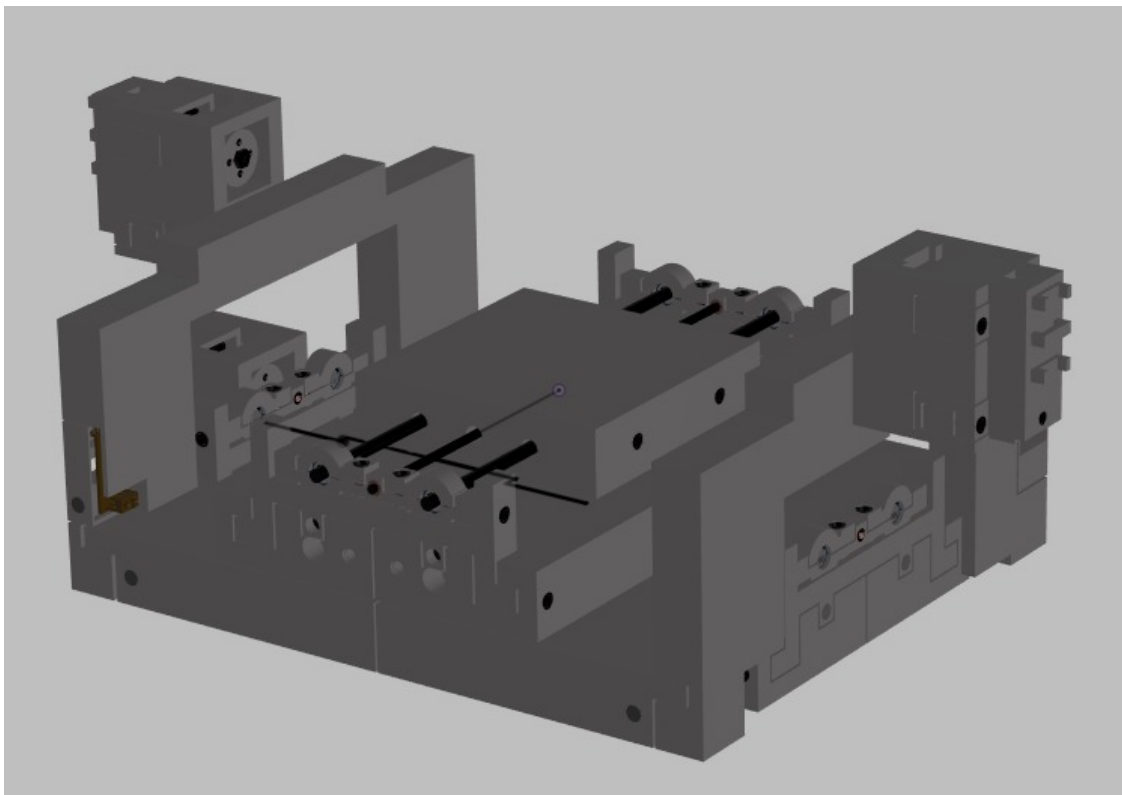


Figura 4.3: Diseño 3D de la plataforma movil del dispositivo LTS desarrollado

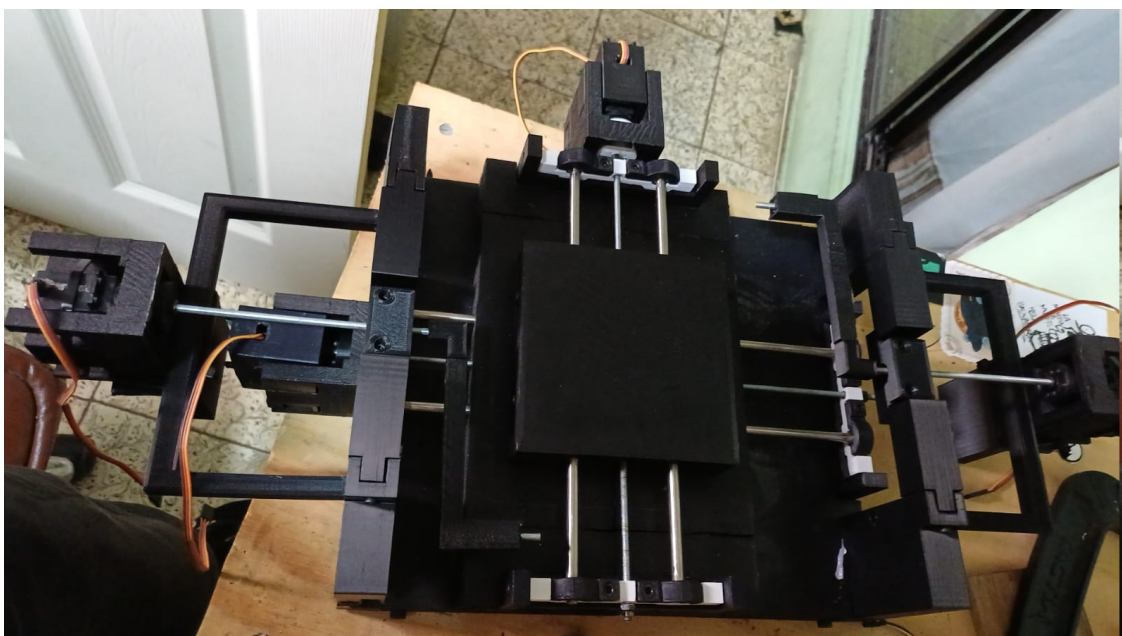


Figura 4.4: Impresion 3D de la plataforma movil del dispositivo LTS desarrollado

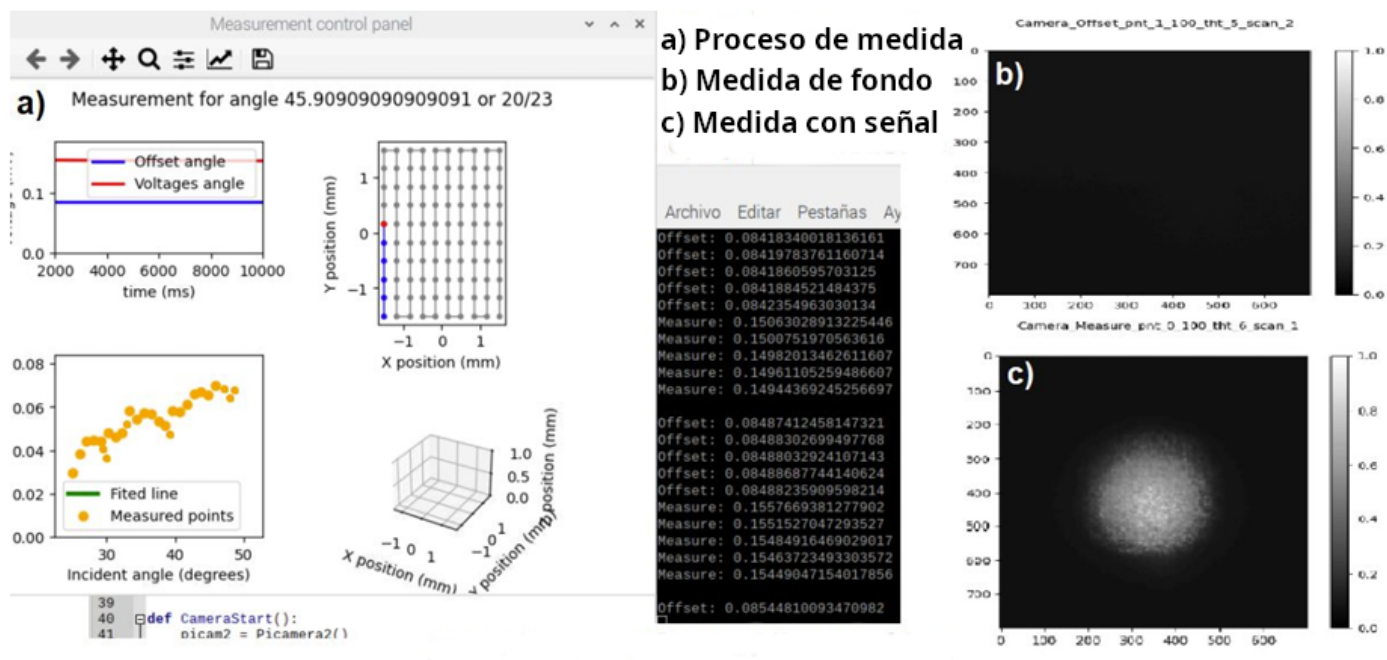


Figura 4.5: Imagen de interfaz gráfica del prototipo en funcionamiento.

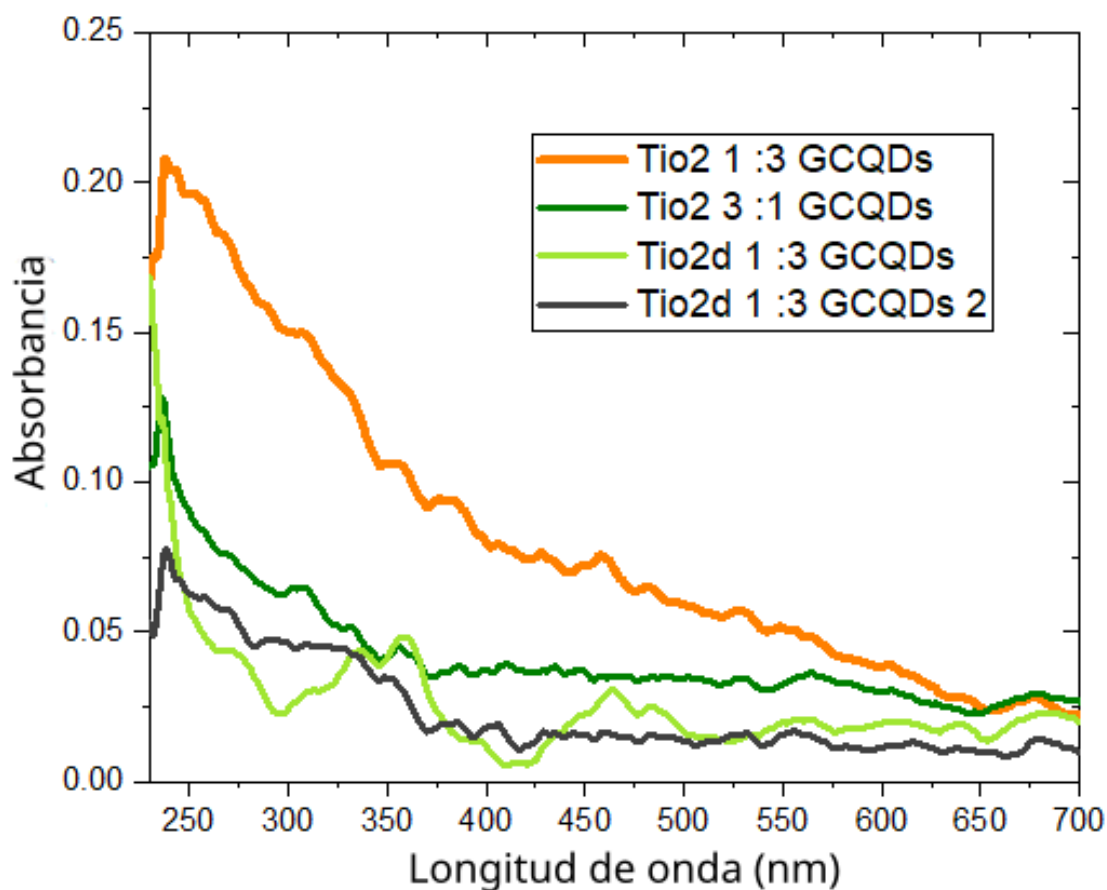


Figura 4.6: Espectros de absorbancia de distintas muestras de TiO₂-GCQDs.

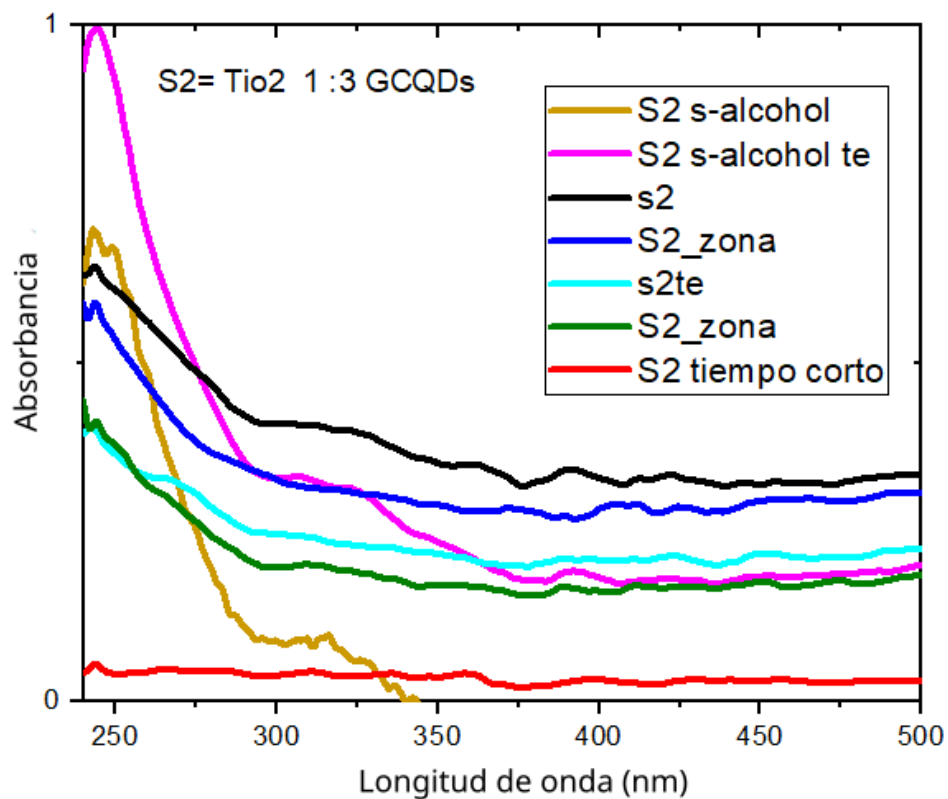


Figura 4.7: Espectros de absorbancia de la película delgada S2 utilizando diferentes volúmenes de etanol y tiempo de homogenización

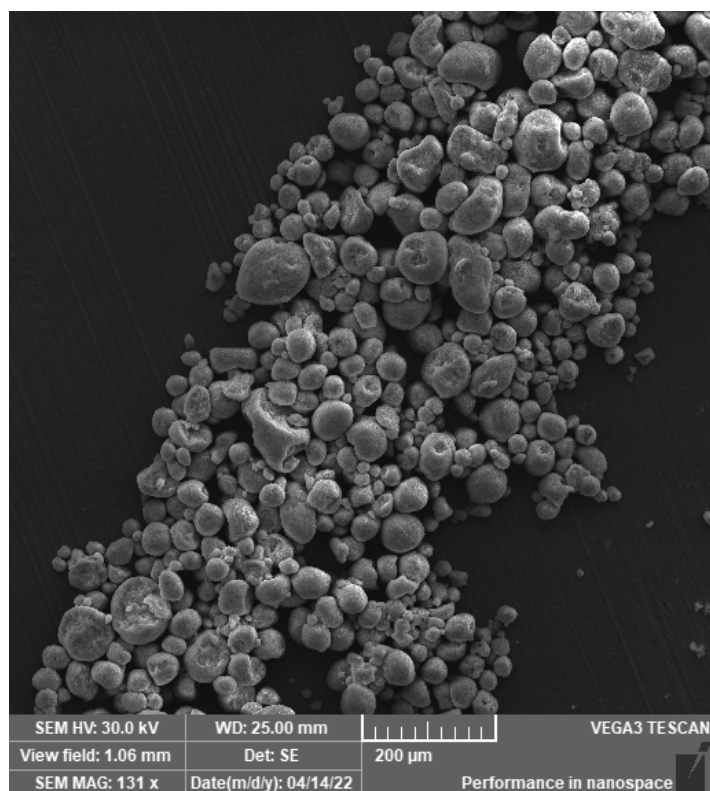


Figura 4.8: Imagen SEM de película de TiO_2 vista superficialmente

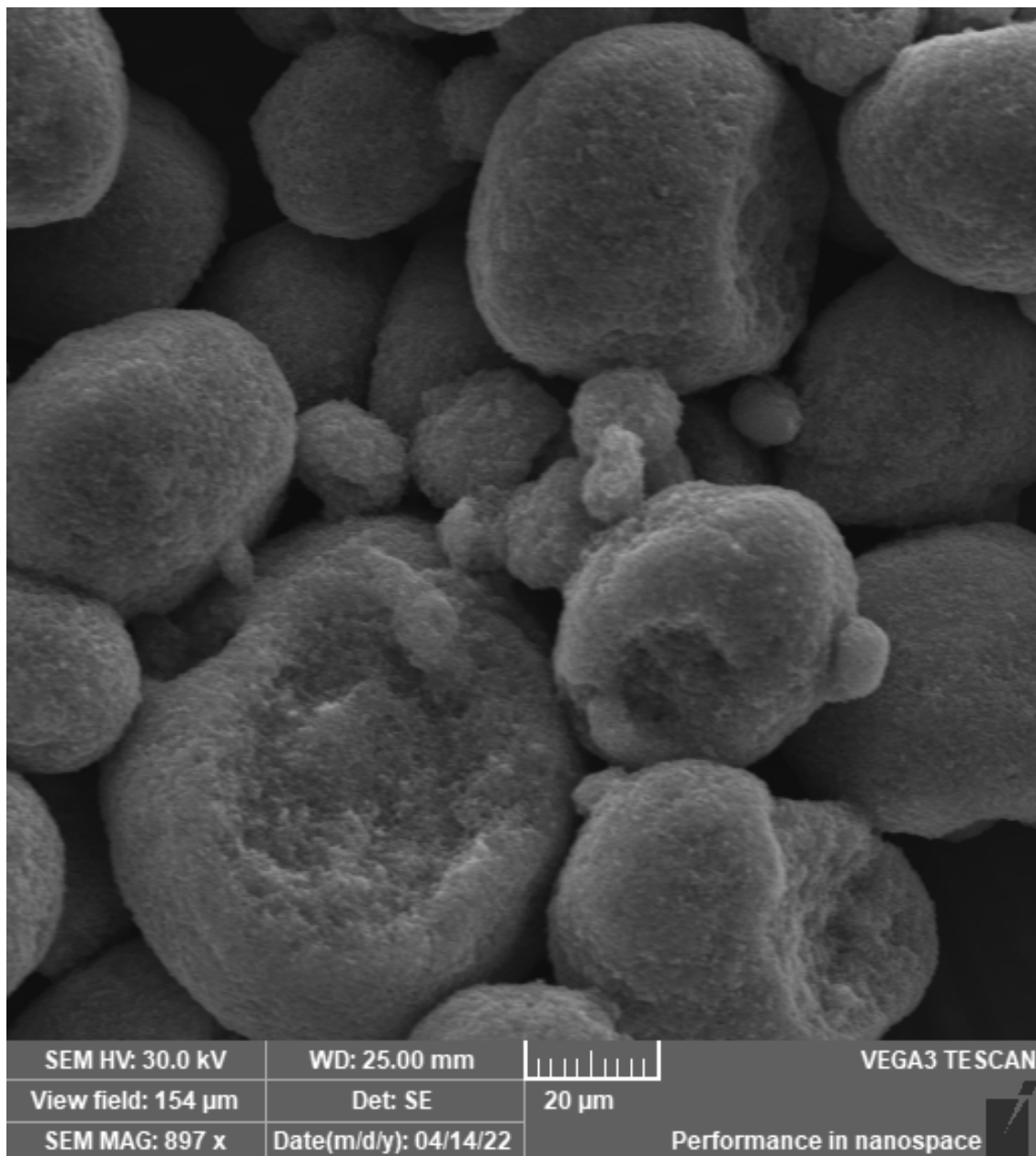


Figura 4.9: Imagen SEM de los aglomerados de TiO_2 formados en la preparación

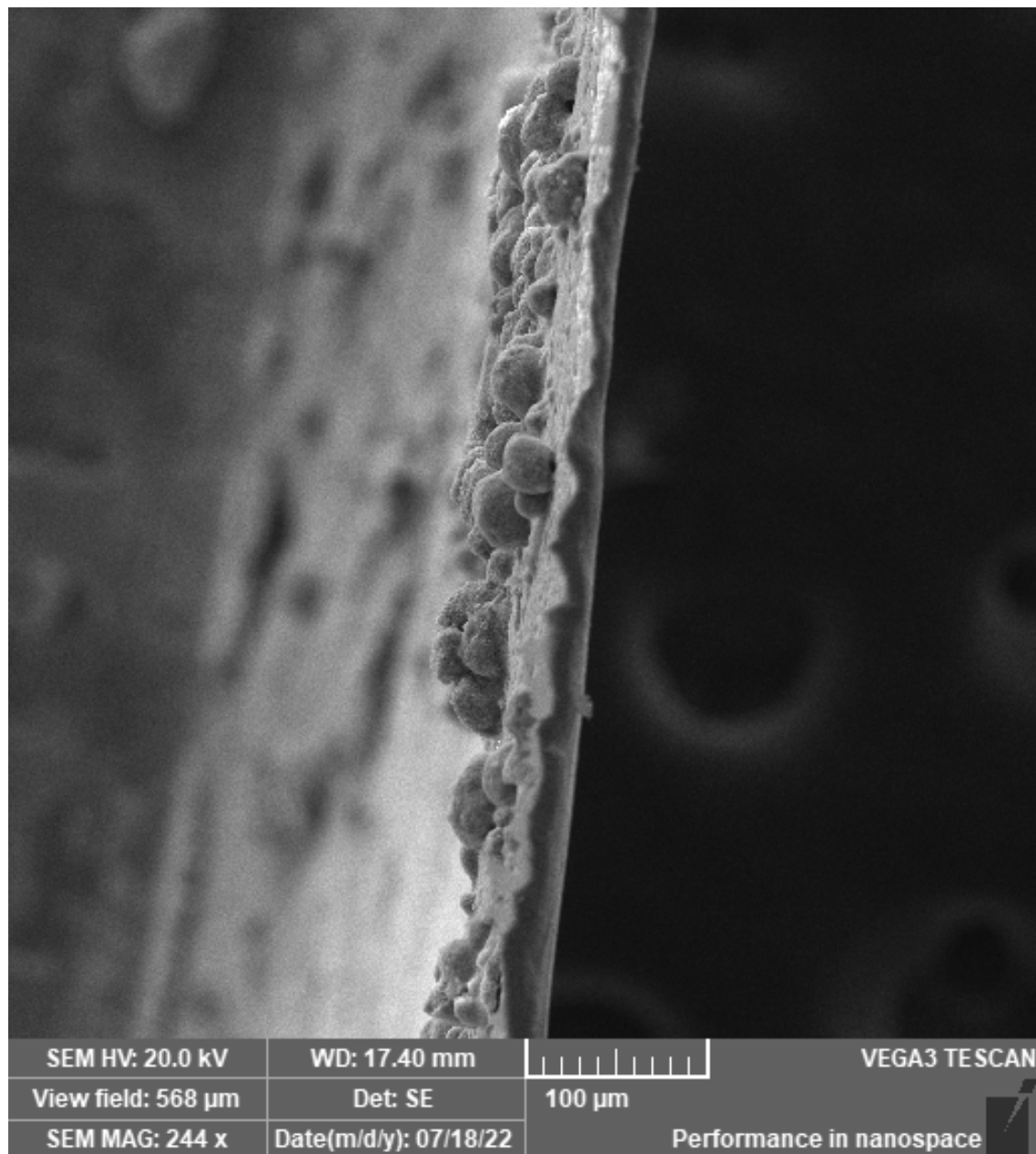


Figura 4.10: Imagen SEM de vista lateral de película delgada de TiO₂

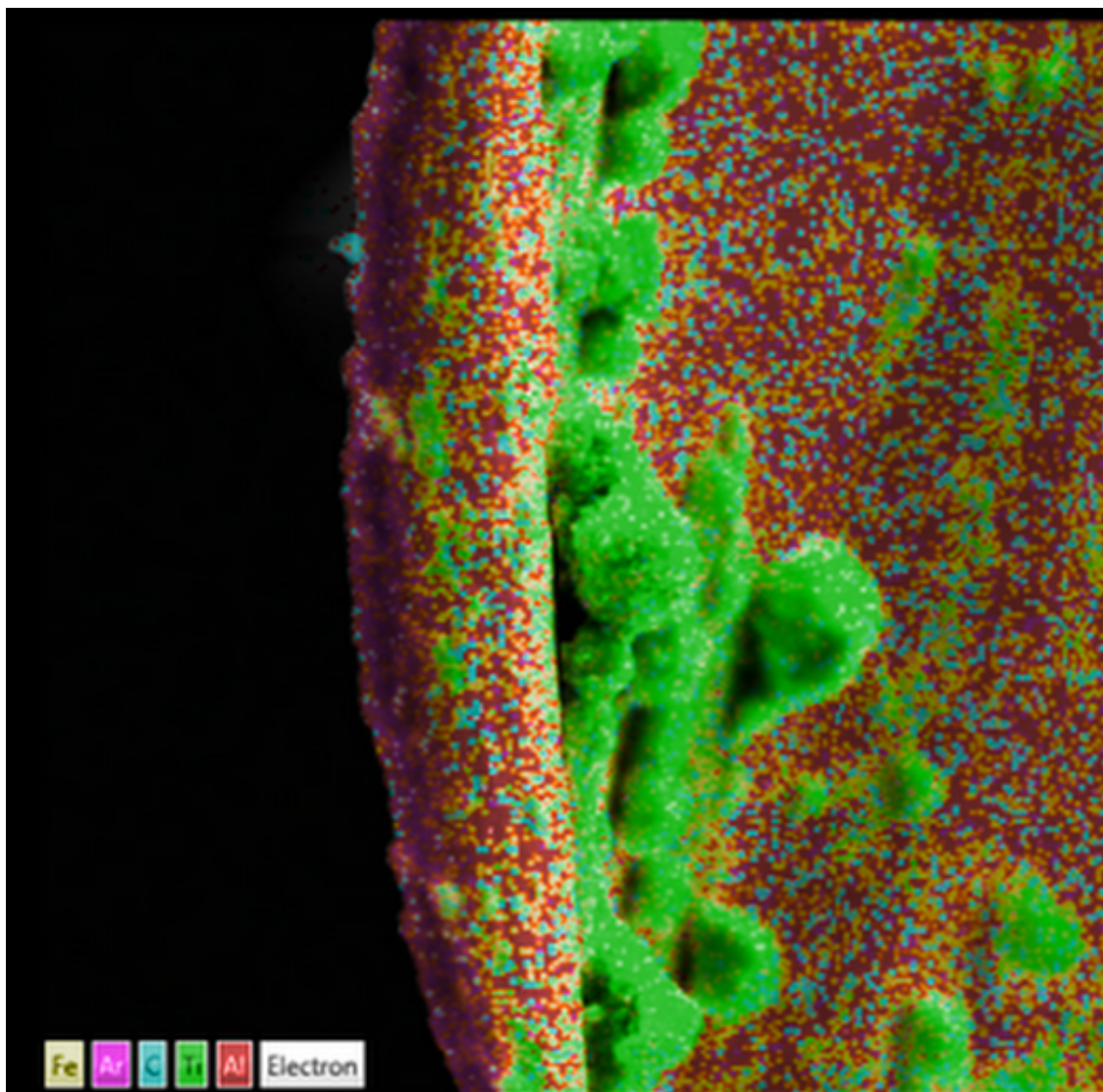


Figura 4.11: Análisis de energía de dispersión de rayos X de película delgada de TiO_2