

Efecto del tipo de partícula de carbono sobre las propiedades fotocatalíticas en películas TiO₂:C

Martínez González María Fernanda¹, Zapata Torres Martín Guadalupe¹,
Cruz González Nadia¹, Valaguez Velazquez Enrique²



¹Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Legaria, Legaria 694 CP 11500, Ciudad de México.

ISSN 1870-9095

²Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Av. IPN 2580 CP 07340, Ciudad de México.

E-mail: mmartinezg1414@alumno.ipn.mx

(Recibido el 16 de octubre de 2025, aceptado el 19 de diciembre de 2025)

Resumen

Se crecieron películas gruesas de TiO₂, las cuales fueron modificadas con dos diferentes fuentes de carbón; carbón dots y carbón mesoporoso. Se estudió el efecto de estas fuentes de carbón en las propiedades estructurales, electroquímicas y de longitudes de onda de activación. Se encontró que el tipo de fuente de carbón está íntimamente relacionado con el tamaño de la partícula incorporada a la muestra y es determinante sobre estas propiedades. Se realizaron experimentos de fotodegradación de las muestras obtenidas sobre Rodamina B, encontrándose que el mejor material para esta aplicación es el TiO₂ con carbón dots.

Palabras clave: TiO₂:C, fotocatálisis solar, tratamiento de agua residual.

Abstract

TiO₂ thick films were grown, and there were modified with two different carbon sources: carbon dots and mesoporous carbon. The effect of these carbon sources on the structural, electrochemical, and activation wavelength were studied. It was found that the type of carbon source, which is closely related to the size of the particle incorporated into the sample, is decisive for these properties. Photodegradation experiments were carried out on the obtained samples using Rhodamine B as colorant, finding that the best material for this application is TiO₂ with carbon dots.

Keywords: TiO₂:C, solar photocatalysis, wastewater treatment.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el crecimiento de la población y el aumento de las actividades industriales han provocado la liberación al medio ambiente de numerosas sustancias químicas y biológicas responsables de la contaminación del aire, suelo y agua. Entre estos contaminantes se encuentran compuestos orgánicos como colorantes, pesticidas, productos farmacéuticos y químicos industriales que alteran los ecosistemas y representan un riesgo a la salud humana [1].

El incremento de estos compuestos en cuerpos de agua ha impulsado la búsqueda de estrategias de tratamientos más eficientes y amigables con el medio ambiente. Entre los métodos convencionales utilizados se encuentra la cloración, la ozonización y la irradiación con luz ultravioleta. Sin embargo, presentan limitaciones en su eficacia y sostenibilidad. Ante esta problemática, la fotocatálisis heterogénea ha sido ampliamente estudiada en la degradación de contaminantes orgánicos debido a su alta eficiencia, simplicidad, buena reproducibilidad, no tóxico y compatibilidad con el medio ambiente para eliminar contaminantes orgánicos presentes en el agua [2, 3].

La fotocatálisis, es un proceso de oxidación avanzada (POA), se basa en la reacción entre contaminantes orgánicos y radicales altamente oxidativos formados en la superficie del fotocatalizador. Al irradiar la superficie de un semiconductor con fotones cuya energía es igual o mayor que su energía gap, los electrones (e^-) son excitados desde la banda de valencia (VB) hacia la banda de conducción (CB) del semiconductor, dejando una vacancia positiva o un hueco (h^+) en la banda de valencia. Estos portadores de carga pueden migrar a la superficie del material para participar en reacciones de oxidación y reducción.

En general, el proceso de degradación fotocatalítica se puede dividir en cuatro etapas: 1) irradiación del catalizador, 2) generación de los portadores de carga, 3) separación y migración de los portadores de carga 4) reacciones de oxidación y reducción en la superficie del catalizador [4, 5].

Se han estudiado una amplia gama de materiales fotocatalíticos, incluyendo sistemas basados en metales nobles, óxidos y sulfuros de metales de transición, nitruros metálicos y perovskitas, cada uno con ventajas distintivas en la absorción de luz, la separación de cargas y el potencial redox.

El dióxido de titanio (TiO_2) es uno de los photocatalizadores más estudiados y utilizados en catálisis heterogénea debido a su elevada actividad photocatalítica, baja toxicidad, biocompatibilidad y capacidad para degradar y mineralizar contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en aguas residuales. Sin embargo, presenta limitaciones importantes: una rápida recombinación de los pares electrón-hueco fotogenerados, que reduce su eficiencia photocatalítica, y una absorción restringida a la región UV del espectro solar, restringiendo su aprovechamiento a aproximadamente el 5% de la radiación incidente [6, 7].

El creciente interés para superar estas limitaciones ha impulsado el desarrollado diferentes estrategias de modificación del TiO_2 , tales como el acoplamiento con semiconductores, metales y materiales de carbono, con el objetivo de extender su actividad a la región visible y reducir la recombinación de cargas. Entre estas alternativas, los materiales de carbono destacan por sus propiedades únicas: alta resistencia mecánica, excelente conductividad térmica y elevada movilidad de portadores de carga. Estas características favorecen el transporte de carga y disminuyen la recombinación de cargas fotogeneradas, aspectos fundamentales para incrementar la eficiencia del proceso photocatalítico [8, 9].

En este artículo, se estudia la influencia de dos fuentes de carbono: carbón mesoporoso y carbon dots, en las propiedades de las películas de TiO_2 . Se utilizaron los materiales desarrollados en la degradación photocatalítica de la rodamina B.

II. DETALLES EXPERIMENTALES

Todos los reactivos se utilizaron sin purificación previa. Ácido cítrico (Sigma Aldrich, 99,5%), Alcohol isopropílico (Sigma Aldrich, 99,5%), Etanol absoluto (J. Baker), Etilenglicol (Sigma Aldrich, 99,5%), Hexano (Sigma Aldrich, 95%), isopropóxido de titanio (Sigma Aldrich, 97%), nanopartículas de dióxido de titanio (PM25, sigma aldrich), carbon dots (sigma aldrich), carbon mesoporoso (sigma aldrich). La solución Pechini de TiO_2 se preparó a partir de isopropóxido de titanio, ácido cítrico y etilenglicol con relación molar de 1:4:16, respectivamente. En un matraz volumétrico se mezcló etilenglicol e isopropóxido de titanio, la mezcla se mantuvo a 85 °C bajo agitación magnética por 5 min. Posteriormente se añadió ácido cítrico en polvo, se mantuvo la temperatura y la agitación hasta obtener una solución transparente y se dejó enfriar a temperatura ambiente [10].

Las películas de dióxido de titanio con carbon dots (TiO_2 :CD) se depositaron mediante la técnica de spin-coating, utilizando nanopartículas comerciales de TiO_2 (PM25) y carbon dots inmersas en solución Pechini de TiO_2 . Estos materiales se dispersaron en etanol durante 5 minutos. A esta dispersión se le añadió la solución Pechini con una relación volumétrica de 1000:1 (solución pechini:nanopartículas). Las películas de dióxido de titanio con carbón mesoporoso TiO_2 :CM se depositaron siguiendo el mismo procedimiento

descrito anteriormente, para aumentar la concentración de carbono se adicionó carbono mesoporoso con concentración atómica del 5%, estas fueron previamente dispersadas en etano y se sometieron a ultrasónico durante 5 minutos. Posteriormente se incorporaron en la solución de Pechini con nanopartículas de TiO_2 .

Para obtener las películas de TiO_2 :CD y TiO_2 :CM, las soluciones se depositaron sobre sustratos de vidrio (VELAB) y sustratos de titanio (Sigma Aldrich, 99,7%) ambos sustratos con un área superficial de 2.5 x 2.5 cm, se depositaron tres capas sobre cada sustrato de 200 μ l mediante la técnica de spin-coating, se secaron a una temperatura de 60°C entre capa y capa. Finalmente, se sometieron a tratamiento térmico durante una hora a 450°C en un horno tubular (LINDERG/BLUE) con atmósfera de aire extra seco.

Las películas de TiO_2 se sintetizaron mediante la técnica de dip-coating. La solución precursora se preparó mezclando isopropóxido de titanio, isopropanol y etanol con una relación volumétrica de 1:2:8, respectivamente. Primero, en un matraz volumétrico se adicionó isopropóxido de titanio e isopropanol bajo con agitación magnética. Despues de 10 minutos, se incorporó el etanol y se mantuvo la agitación por 5 minutos. Los sustratos de vidrio (VELAB) y sustratos de titanio (Sigma Aldrich, 99,7%) ambos con un área de 2.5 x 2.5 cm, se sumergieron en la solución durante 5 minutos y luego se secaron durante 10 minutos en un horno Brinder GmbH Bergstr 14D-78532 Tuttlingen a 100°C para eliminar los disolventes. Este proceso se repitió tres veces. Finalmente se secaron durante 2 horas y se sometieron a tratamiento térmico en un horno tubular (LINDERG/BLUE) durante 1 hora a 350°C [11].

Las imágenes de microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FE-SEM) se obtuvieron con un modelo Auriga de Zeiss, operando con un detector de electrones secundario de 1 KV. Los patrones de difracción de rayos X (DRX) se obtuvieron en un difractómetro de rayos X utilizando radiación CuK α a una velocidad de exploración (2θ) de 5° a 80°. La medición de espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS) se analizó utilizando un instrumento científico de superficies X-probe, X-Ray000 400um-FG que emplea radiación Al K α .

Para determinar la longitud de onda de activación para cada muestra, se realizaron mediciones de photocorriente vs longitud de onda (IW) usando una disposición convencional de dos electrodos en la celda electroquímica, se usó una malla de platino de 1 cm² como contraelectrodo y las muestras que se depositaron sobre sustratos de titanio se usaron como electrodos de trabajo (Ti/TiO_2 , Ti/TiO_2 :CD y Ti / TiO_2 : CM). Como fuente de luz se utilizó una lámpara de xenón (modelo 66901, Oriel Instruments) y su fuente de alimentación OPS-A500. El espectrómetro Spex 500 funcionó como un monocromador y se empleó el electrómetro Keithley 6517 para medir la photocorriente generada.

Se realizó la caracterización de cronoamperometría con el objetivo de evaluar las variaciones en la photocorriente bajo diferentes condiciones de iluminación. Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un potenciómetro/galvanómetro VersaSTAT3 Autolab controlado mediante el software Versa

Studio®. Se empleó una configuración de celda electroquímica de dos electrodos, como contraelectrodo se utilizó una malla de platino de 1 cm^2 y las películas depositadas sobre sustratos de titanio se utilizaron como electrodos de trabajo (Ti/TiO_2 , $Ti/TiO_2:CD$ y $Ti/TiO_2:CM$). Se utilizó 18 ml de electrolito, KOH, con una concentración de 0.1 M.

Como fuente de iluminación se utilizó una lámpara de xenón (modelo 66901, Oriel Instruments) Para simular el espectro de radiación solar, se colocó un filtro óptico AM1.5 entre la fuente de luz y la ventana de la celda electroquímica. Adicionalmente, se utilizó un filtro óptico, con un rango de longitud de onda a partir de 400 nm con el fin de eliminar la radiación ultravioleta del espectro solar.

La actividad fotocatalítica de $TiO_2:CD$, $TiO_2:CM$ y TiO_2 se evaluó mediante la degradación de 200 ml de una solución de rodamina B [5 mg/ml]. Se utilizaron las muestras depositadas sobre sustratos de vidrio y como fuente de irradiación se una lámpara halógena USHIO de 100 W la cual emite en un rango de 350 nm a 2500 nm. La distancia radial entre la lámpara y el photocatalizador soportado se mantuvo en 3 cm. La solución se irradió durante 6 horas con agitación constante, la absorbancia de la solución se monitoreó en intervalos de una hora, se tomaron 3 ml de muestra y se midió la intensidad de la banda de en 552 nm utilizando un espectrómetro Ocean Optics. La concentración residual del colorante en la solución se determinó a partir de la curva de calibración entre la absorbancia y la concentración de rodamina B.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estructura cristalina de las muestras se determinó mediante difracción de rayos X (DRX). En la Figura 1 se muestran los difractogramas correspondientes a las películas de $TiO_2:CD$ y $TiO_2:CM$. Ambas muestras presentaron una estructura tetragonal característica de la fase anatasa del dióxido de titanio. Se identificaron máximos de difracción en $25,9^\circ$, 37° , 47° , $53,8^\circ$, 55° y $62,2^\circ$ correspondientes a los planos cristalinos (101), (004), (200), (211), (105), y (204), respectivamente, de acuerdo con el PDF card n.º 731764 utilizado para la indexación.

En los difractogramas no se observaron señales atribuidas al carbón, a diferencia de lo reportado por Lim, Chaehun et. al. [12], lo cual puede atribuirse a la baja concentración del carbón en las muestras.

La morfología de las películas se analizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). En la Figura 2 muestra la imagen de la película de $TiO_2:CD$, en ella se observan aglomeraciones formadas a partir de partículas de morfología predominantemente esféricas.

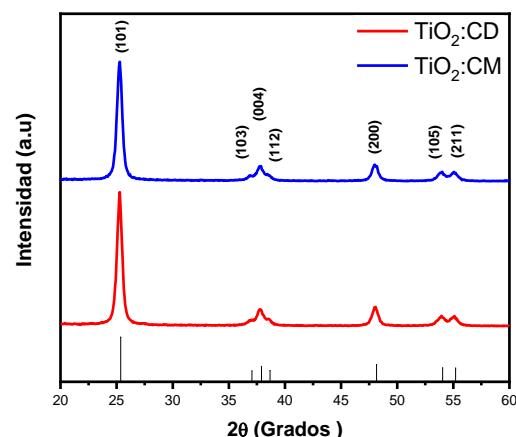


FIGURA 1. Patrones de difracción de rayos X de las muestras $TiO_2:CD$ y $TiO_2:CM$, donde se identifican los planos cristalográficos correspondientes a la fase anatasa del TiO_2 .

Estas aglomeraciones presentan una distribución homogénea sobre la superficie, lo cual sugiere una buena dispersión durante las síntesis. El método Pechini favorece la formación de nanopartículas recubiertas por una matriz polimérica, lo que contribuye a la formación de aglomeración esférica [13]. En contraste, la figura 3 muestra la morfología de la película de $TiO_2:CM$. Se aprecia una disminución en el número de aglomerados esféricos y aumenta el tamaño de las partículas. Estos resultados sugieren que una fracción de las nanopartículas de TiO_2 podría estar ubicada debajo de las partículas de carbono mesoporosas [14].

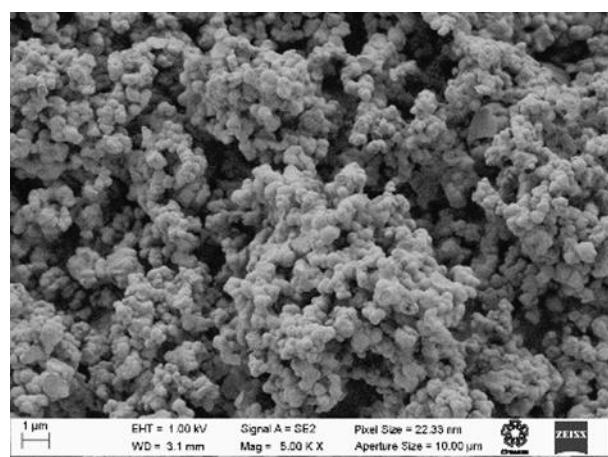


FIGURA 2. Micrografía SEM de las muestras $TiO_2:CD$ donde se observan aglomerados esféricos, la imagen fue adquirida a un aumento de 5.00 kX, con un voltaje de aceleración de 1.00 kV.

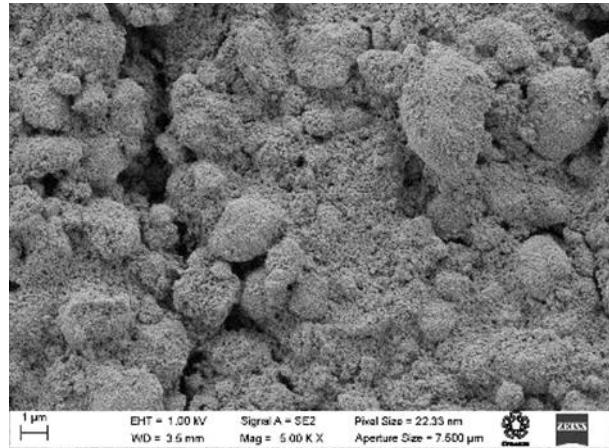
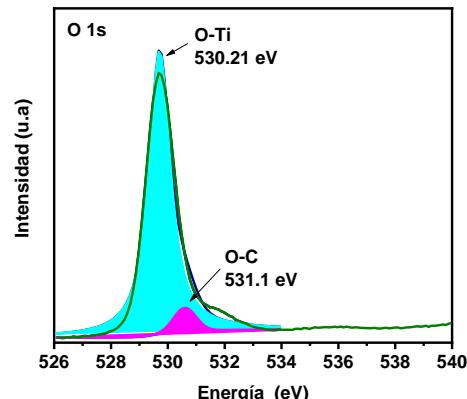


FIGURA 3. Micrografía SEM de las muestras TiO₂:CM, donde se observan una disminución de los aglomerados, la imagen fue adquirida a un aumento de 5.00 kX, con un voltaje de aceleración de 1.00 kV.

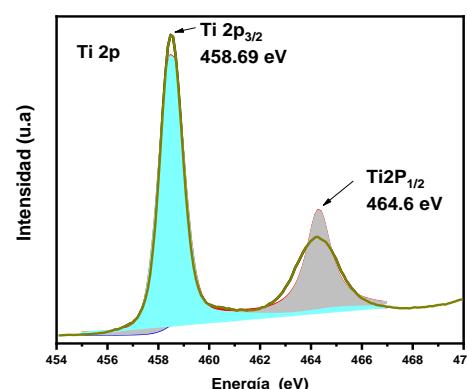
La composición química de la superficie de las películas de TiO₂:CD y TiO₂:CM se estudió mediante espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS). Se detectó la presencia de Titánio, Oxígeno y Carbono.

El análisis de datos XPS se realizó con el software XPSPeak 4.1 [15]. Los valores de las energías de enlace del titanio, el oxígeno y el carbono se tomaron de la base de datos NIST-XPS [16]. Los espectros de TiO₂:CD y TiO₂:CM fueron similares. Para los espectros de O 1s, figura 4a, la intensidad del elemento oxígeno se observó en 530,21 eV, que se atribuye a enlaces Ti-O, y en 531,1 eV, atribuido a átomos de carbono con enlaces CO. El espectro de Ti 2p, figura 4b, exhibió dos picos de intensidad a 458,69 eV para Ti 2p_{3/2} y 464,59 eV correspondientes a Ti 2p_{1/2}, las áreas de señales tienen una relación 2:1, proporción que se utiliza en el ajuste de la curva. En particular, no hay intensidades de energía correspondientes a los enlaces carbono-titanio (Ti-C) a 282 eV, como se informa en el trabajo de Mel, A. A, Angleraud, B. [17] y Ming, Hai Zhang, [18] se encontraron dentro del espectro XPS. Esto muestra que el carbono no está unido al titanio, lo que confirma la presencia de carbono dentro de la muestra y su formación como material compuesto TiO₂:C.

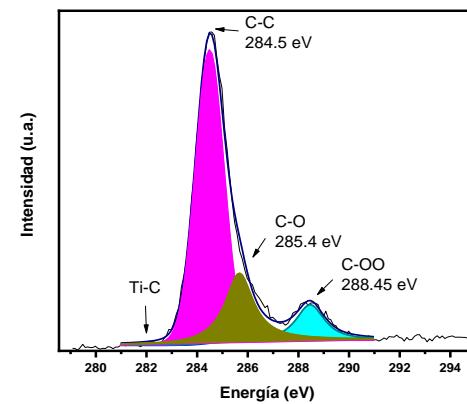
En la figura 4c, se muestra el espectro del carbono (C), que revela energías de enlace a 284,5 eV, 286 eV y 288 eV, correspondientes a enlaces amorfos de carbono, CO y C-OO, respectivamente. Este espectro confirma la presencia de carbono dentro de la muestra y su formación como material compuesto, los autores sugirieron que los residuos de carbono en las películas de TiO₂:CD se formaron durante la calcinación del ácido cítrico como precursor de carbono [19, 20].



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4. Se muestra los espectros XPS de alta resolución de la muestra: (a) O 1s, donde se identifican contribuciones de enlaces O-Ti (530.21 eV) y O-C (531.1 eV); (b) Ti 2p, mostrando el doblete característico de Ti⁴⁺ con picos Ti 2p_{3/2} (458.69 eV) y Ti 2p_{1/2} (464.6 eV); y (c) C 1s, con señales asociadas a enlaces C-C (284.5 eV), C-O (285.4 eV), C-OO (288.45 eV) y Ti-C.

Los resultados de las pruebas de cronoamperometría se muestran en la figura 5. En ellas se observan las respuestas de photocorriente (μA)-voltaje (V) en función del tiempo de las películas de $TiO_2:CD$ y $TiO_2:CM$, cuando se irradiaron con luz solar (a) o luz visible (b), la respuesta de ambas películas se comparó con la respuesta producida por la película de TiO_2 libre de carbón. En la figura 5a se observa que, al irradiar las películas con luz del espectro solar, todas ellas produjeron una respuesta de photocorriente en la superficie del material, la photocorriente generada por la película de $TiO_2:CD$ fue de 45 (μA), más del doble de la photocorriente generada por la muestra de TiO_2 (20 μA), este incremento puede atribuirse a la mejora de la absorción de luz y la supresión efectiva de la recombinación de carga. En contraste, la photocorriente de $TiO_2:CM$ fue tan solo de 10 μA , lo que sugiere una deficiencia en la absorción de luz debido a la clase de las partículas de carbono utilizadas.

Para examinar y evaluar la respuesta de la photocorriente únicamente por la irradiación de la luz visible y con ello observar el efecto de la clase de las partículas de carbono en las muestras; se utilizó un filtro de 400 nm para cortar toda la contribución de la energía UV, (figura 5b). Las películas de TiO_2 y $TiO_2:CM$ no generaron ninguna.

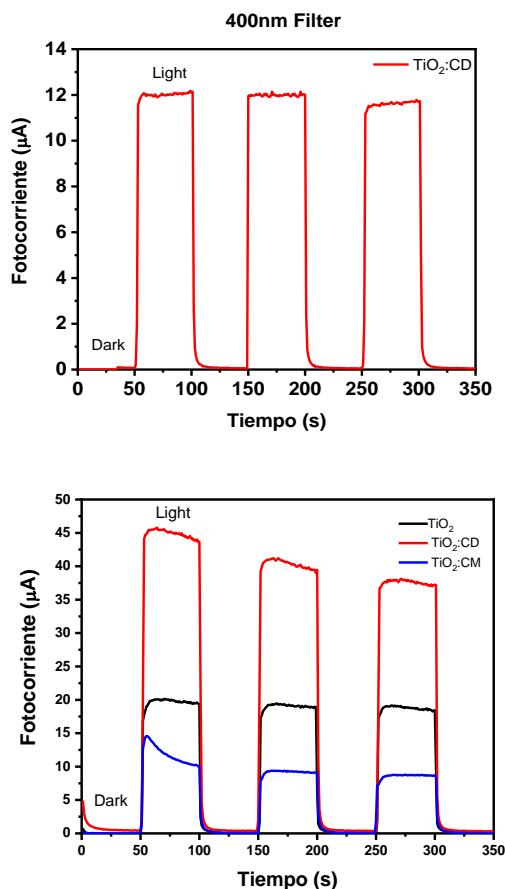


FIGURA 5. Respuesta de la photocorriente en función del tiempo para películas de TiO_2 , $TiO_2:CD$ y $TiO_2:CM$ bajo ciclos de oscuridad e irradiación luminosa (a). El material $TiO_2:CD$ presenta la mayor photocorriente bajo el Filtro AM1.5 (b) Fotocorriente de $TiO_2:CD$ bajo 400nm Filter.

iluminación con filtro de 400 nm, evidenciando su activación eficiente en la región visible.

photocorriente, lo que explica su ausencia en el gráfico. Sin embargo, las películas de $TiO_2:CD$ exhibieron una photocorriente de 12 μA . Este incremento en el valor se atribuye a la presencia de carbón dots, ya que el TiO_2 se activa en longitudes de onda superiores a 387 nm [21]. Los resultados sugieren la que las diferentes formas de incorporación del tipo de carbón afectan en las propiedades electroquímicas, en la película $TiO_2:CM$ el tipo de carbón dentro de la muestra se encuentra en con tamaños de partícula de aproximadamente 10 μm , provocando una absorción muy alta a la radiación electromagnética, implicando una baja penetración de la misma en la muestra. En la película de $TiO_2:CD$ algunos estudios recientes han demostrado la capacidad de los puntos de carbono para mejorar las propiedades fotocatalíticas, gracias a la propiedad de conversión ascendente, que consiste en la emisión de radiación de menor longitud de onda tras la excitación con luz de mayor longitud de onda. Esta propiedad explica la photocorriente generada en longitudes de onda superiores a 387 nm como se propone en el trabajo de Shen et al. en 2014 [22].

Para determinar la longitud de onda de activación para cada muestra, se realizaron mediciones de photocorriente en función de la longitud de onda (IW). Como se muestra en la Figura 6, se observa que en las películas de TiO_2 y $TiO_2:CM$ la fotoactivación comienza a partir de 387 nm, alineándose con la longitud de onda de activación de TiO_2 . En particular, la película $TiO_2:CD$ inicia la fotoactivación actual a 450 nm. Estos hallazgos corroboran los observados mediante cronoamperometría, confirmando la incorporación de puntos de carbono en $TiO_2:CD$ y su activación en la región visible del espectro.

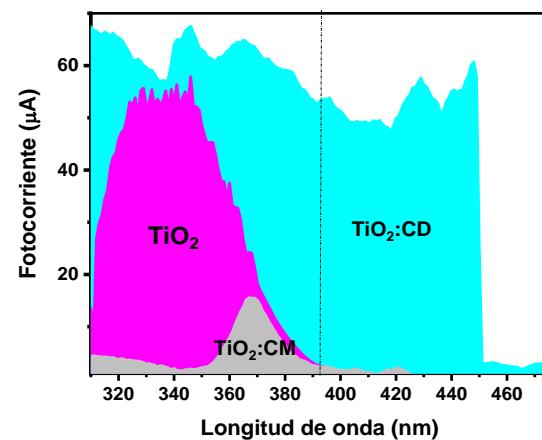


FIGURA 6. La figura muestra la respuesta de photocorriente en función de la longitud de onda para películas basadas en TiO_2 , $TiO_2:CM$ y $TiO_2:CD$. En el eje horizontal se representa la longitud de onda (nm), mientras que en el eje vertical se muestra la photocorriente generada (μA).

La actividad fotocatalítica de la películas de $TiO_2:CD$, $TiO_2:CM$ y TiO_2 se investigó monitorizando la intensidad de la

banda de absorción en 552 nm de la solución de rodamina B [5 mg/ml] bajo irradiación con luz visible, como se muestra en la figura 7. Después de 6 horas, el porcentaje de degradación para la película TiO₂:CD fue de un 88.5%, la película de TiO₂ no superó el 50% de degradación y el desempeño de la película de TiO₂:CM fue muy deficiente, degradando solo el 11% del contaminante. Esto es puede ser debido a que las partículas de carbón, dependiendo de su origen, distribución y tamaño tiene una alta influencia en la absorción de la radiación.

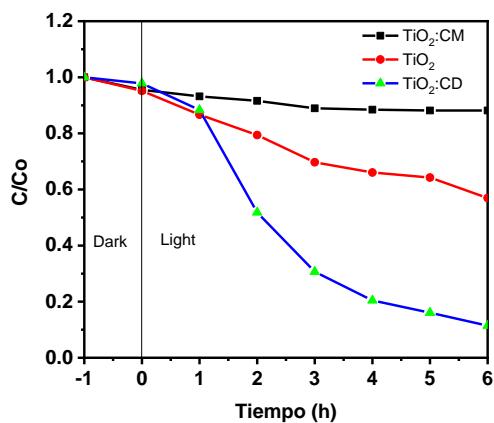


FIGURA 7. La figura muestra la variación de la concentración normalizada (C/C_0) en función del tiempo durante el proceso de degradación fotocatalítica para TiO₂, TiO₂:CD, TiO₂:CM. En el eje horizontal se representa el tiempo de reacción (h), mientras que en el eje vertical se muestra la relación C/C_0 , donde C es la concentración en un tiempo determinado y C_0 la concentración inicial.

IV. CONCLUSIONES

La película TiO₂:CD presentó una respuesta fotocatalítica significativamente mejorada en comparación con TiO₂ y TiO₂:CM. Los resultados experimentales muestran que la incorporación de carbono favorece la transferencia de electrones fotogenerados, inhibiendo su recombinación gracias al aumento en la movilidad de carga. La absorción óptica y el tamaño de las partículas de carbono son determinantes en el desempeño del fotocatalizador.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional (IPN) y al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Unidad Legaria, por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo. Asimismo, se agradece el apoyo del Laboratorio de Materiales Funcionales por el acceso a la infraestructura y equipos de caracterización.

REFERENCIAS

- [1] Krishnan, R. Y. et al., *Removal of emerging micropollutants originating from pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water and wastewater by advanced oxidation processes: A review*, Environ Technol Innov **23**, 654 (2021).
- [2] Kishor, R. et al., *Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety*, J Environ Chem Eng **9**, 105012 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>.
- [3] Zhu, D. & Zhou, Q., *Action and mechanism of semiconductor photocatalysis on degradation of organic pollutants in water treatment: A review*, Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management **12**, 100255 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019>.
- [4] Rengifo-Herrera, J. A. & Pulgarin, C., *Why five decades of massive research on heterogeneous photocatalysis, especially on TiO₂, has not yet driven to water disinfection and detoxification applications. Critical review of drawbacks and challenges*, Chemical Engineering Journal **477**, 146875 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146875>.
- [5] Jari, Y. et al., *A comprehensive review on TiO₂-based heterogeneous photocatalytic technologies for emerging pollutants removal from water and wastewater: From engineering aspects to modeling approaches*, Journal of Environmental Management **373**, 123703 (2025), Preprint at <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123703>.
- [6] F.A. Filippin, E. Santos, L.B. Avalle, *Semiconductor properties Titanium oxide formed on glass/Ti/TiO₂ substrates in diluted acid solution*. Anales AFA Vol. **28**, 45-49 (2017).
- [7] Kumaravel, V., Mathew, S., Bartlett, J. & Pillai, S. C., *Photocatalytic hydrogen production using metal doped TiO₂: A review of recent advances*, Applied Catalysis B: Environmental **244**, 1021–1064 (2019), <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.11.080>.
- [8] Kuldeep, A. R., Bhosale, A. S. & Garadkar, K. M., *Enhanced photocatalytic performance of TiO₂-carbon nanocomposite*, Journal of Materials Science: Materials in Electronics **31**, 9006–9017 (2020).
- [9] Wu, J. C., Chuang, Y. H., Liou, S. Y. H., Li, Q. & Hou, C. H., *In situ engineering of highly conductive TiO₂/carbon heterostructure fibers for enhanced electrocatalytic degradation of water pollutants*, J Hazard Mater **429**, 128328 (2022).
- [10] Souza, D. R., Neves, J. V. S., França, Y. K. S. & Malheiro, W. C., *TiO₂ Synthesis by the Pechini's Method and Application for Diclofenac Photodegradation*, Photochem Photobiol **97**, 32–39 (2021).
- [11] Kite, S. V., Sathe, D. J., Patil, S. S., Bhosale, P. N. & Garadkar, K. M., *Nanostructured TiO₂ thin films by chemical bath deposition method for high photoelectrochemical performance*, Mater Res Express **6**, 026411 (2019).
- [12] Lim, C. et al., *Carbon-titanium dioxide heterogeneous (photo)catalysts (C-TiO₂) for highly efficient visible light photocatalytic application*, Compos B Eng **241**, 109997 (2022).

- [13] Wiranwetchayan, O., Promnopat, S., Thongtem, T., Chaipanich, A. & Thongtem, S., *Effect of polymeric precursors on the properties of TiO₂ films prepared by sol-gel method*, Mater Chem Phys **240**, 122219 (2020).
- [14] Coromelci-Pastravanu, C., Ignat, M., Popovici, E. & Harabagiu, V., TiO₂-coated mesoporous carbon: Conventional vs. microwave-annealing process, J Hazard Mater **278**, 382–390 (2014).
- [15] <http://xpspeak.software.informer.com/4.1/>. Consultado el 5 de enero de 2025.
- [16] <https://srdata.nist.gov/xps/selEnergyType.aspx>. Consultado el 5 de enero de 2025.
- [17] El Mel, A. A., Angleraud, B., Gautron, E., Granier, A. & Tessier, P. Y., *XPS study of the surface composition modification of nc-TiC/C nanocomposite films under in situ argon ion bombardment*, Thin Solid Films **519**, 3982–3985 (2011).
- [18] Ming, H. et al., *Scanning transmission X-ray microscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, and cyclic voltammetry study on the enhanced visible photocatalytic mechanism of carbon-TiO₂ nanohybrids*, Appl Surf Sci **258**, 3846–3853 (2012).
- [19] Sakthivel, S. & Kisch, H., Daylight Photocatalysis by Carbon-Modified Titanium Dioxide, Angewandte Chemie - International Edition **42**, 4908–4911 (2003).
- [20] Górska, P. et al., TiO₂ photoactivity in vis and UV light: The influence of calcination temperature and surface properties, Appl Catal B **84**, 440–447 (2008).
- [21] Aliyeva, H. et al., Photo-anodes based on TiO₂ and carbon dots for photo-electrocatalytical measurements, Mater Lett **250**, 119–122 (2019).
- [22] Sendão, R. M. S., Esteves da Silva, J. C. G. & Pinto da Silva, L., Photocatalytic removal of pharmaceutical water pollutants by TiO₂ – Carbon dots nanocomposites: A review, Chemosphere **301**, (2022).