Naturaleza y TECNOLOGÍA
Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

# ESTUDIO DE LA FOTOOXIDACIÓN DE COMPOSITES DE POLIPROPILENO MODIFICADOS CON $TIO_2$ FUNCIONALIZADO MEDIANTE AGENTES DE ACOPLAMIENTO SILANO BAJO RADIACIÓN UV EN MEDIO ACUOSO

María Monserrat Hernández Rodríguez [a], Ariadna Lihuen Hernández Sánchez [a], Sara Julia Tinoco Silva [a], Nadia Villafaña Mata [a], Karla Gabriela González Fuentes [a,*], Claudia Martínez Gómez [a,*]

[a] Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato Noria Alta s/n, Guanajuato, Gto. 36050, México. *claudia.martinez@ugto.mx

**Resumen**

La funcionalización superficial del dióxido de titanio ($TiO_2$) con agentes de acoplamiento silano representa una estrategia para modificar el comportamiento fotooxidativo de composites de polipropileno (PP). Se evaluó el efecto de diferentes agentes de funcionalización sobre composites del PP sometidos a radiación ultravioleta (UV). Los materiales fueron obtenidos mediante funcionalización superficial del $TiO_2$ y extrusión, y posteriormente caracterizados mediante espectroscopía FTIR, el índice de carbonilo y pérdida de masa durante un proceso de envejecimiento acelerado. Los resultados permitieron identificar diferencias en el comportamiento fotooxidativo de los composites en función del agente de funcionalización empleado, evidenciando la influencia de la modificación superficial del $TiO_2$ sobre la estabilidad del material. Estos hallazgos aportan información para el diseño y desarrollo de composites poliméricos con comportamiento controlado frente a la degradación inducida por radiación UV.

*Palabras clave:* Polipropileno; dióxido de titanio; agentes de acoplamiento silano; fotooxidación; índice de carbonilo

Naturaleza y TECNOLOGÍA

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

# STUDY OF THE PHOTOOXIDATION OF POLYPROPYLENE COMPOSITES MODIFIED WITH $TiO_2$ FUNCTIONALIZED USING SILANE COUPLING AGENTS UNDER UV RADIATION IN AN AQUEOUS MEDIUM

**Abstract**

The surface functionalization of titanium dioxide ($TiO_2$) with silane coupling agents is a strategy for modifying the photooxidative behavior of polypropylene (PP) composites. The effect of different functionalization agents on PP composites exposed to ultraviolet (UV) radiation was evaluated. The materials were prepared through surface functionalization of $TiO_2$ and extrusion, and subsequently characterized using FTIR spectroscopy, the carbonyl index, and mass loss during an accelerated aging process. The results revealed differences in the photooxidative behavior of the composites depending on the functionalization agent used, demonstrating the influence of $TiO_2$ surface modification on material stability. These findings provide insights for the design and development of polymer composites with controlled behavior against UV-induced degradation.

*Keywords:* Polypropylene; titanium dioxide; silane coupling agents; photooxidation; carbonyl index

## 1. Introducción

Los plásticos constituyen uno de los materiales más utilizados a nivel mundial debido a su versatilidad, bajo costo de producción y excelentes propiedades físicas y químicas (PlasticsEurope, 2025). Desde mediados del siglo XX, su producción ha experimentado un crecimiento exponencial como consecuencia del aumento de la demanda en diversos sectores industriales y de consumo, superando actualmente los 400 millones de toneladas anuales (PlasticsEurope, 2024, 2025). Sin embargo, este incremento ha generado una gran cantidad de residuos sólidos que representan un importante desafío ambiental, ya que una proporción considerable termina en rellenos sanitarios o es desechada de manera inadecuada, acumulándose en ecosistemas terrestres y acuáticos (Andrady, 2011; Borrelle y col., 2020). Debido a su elevada estabilidad química, estos materiales pueden permanecer durante décadas o incluso siglos antes de degradarse. La exposición

prolongada a factores ambientales como la radiación ultravioleta, el oxígeno, la humedad y el desgaste mecánico favorece procesos de fotooxidación que provocan la fragmentación del material en microplásticos, los cuales pueden dispersarse en el suelo, cuerpos de agua y atmósfera, generando efectos negativos sobre los ecosistemas y potencialmente sobre la salud humana (Andrady, 2011; Huang y col., 2022). Debido a esta problemática, existe un gran interés en desarrollar estrategias que permitan acelerar la degradación de materiales poliméricos mediante procesos inducidos por radiación ultravioleta (Massardier y Louizi, 2015).

El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico perteneciente a la familia de las poliolefinas, obtenido mediante la polimerización del monómero propileno. Se ha convertido en uno de los plásticos de mayor producción y consumo a nivel mundial debido a sus propiedades mecánicas, químicas y económicas, además de su facilidad de procesamiento mediante técnicas como extrusión, moldeo por inyección y soplado (Karger-Kocsis, 1995). Su estructura está formada por largas cadenas de unidades repetitivas derivadas del propileno, cuya disposición determina la cristalinidad y las propiedades del material, siendo el polipropileno isotáctico el de mayor uso comercial. Se caracteriza por su baja densidad, resistencia mecánica y estabilidad térmica, lo que permite su empleo en envases, componentes automotrices, tuberías, artículos domésticos, dispositivos médicos y equipos eléctricos (Karger-Kocsis, 1995). No obstante, una de sus principales limitaciones es su sensibilidad a la radiación ultravioleta, ya que la irradiación UV favorece la ruptura de las cadenas poliméricas mediante procesos fotooxidativos, provocando pérdida de propiedades mecánicas, cambios de color, fragilidad y, finalmente, la formación de microplásticos (Massardier y Louizi, 2015; Palafox-González y col., 2023). Con el propósito de mejorar las propiedades de las matrices poliméricas y modificar su comportamiento frente a la degradación, se han incorporado diversos aditivos, entre los que destacan los rellenos (Rothon, 2003; Xanthos, 2010). Este tipo de aditivo no solo contribuye a mejorar propiedades mecánicas del material, sino que también puede promover o inhibir su degradación, dependiendo de la naturaleza del relleno y de la interacción que se establezca con la matriz polimérica (Karger-Kocsis, 1995; Palafox-González y col., 2023).

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

Entre los rellenos más utilizados se encuentra el dióxido de titanio ($TiO_2$), debido a las propiedades ópticas, mecánicas y fotocatalíticas que proporciona el material (Chen y Mao, 2007). Este material puede presentarse en las fases anatasa y rutilo, siendo la anatasa uno de los principales fotocatalizadores empleados, mientras que la fase rutilo es el pigmento blanco de mayor uso. Debido a su ancho de banda prohibida, la radiación entre 350 y 400 nm favorece la formación de grupos radicales, especialmente en presencia de aire o humedad, promoviendo la posterior degradación del material (Palafox-González y col., 2023).

Una alternativa para disminuir este comportamiento consiste en modificar superficialmente el $TiO_2$ mediante agentes de acoplamiento de silano (Lestari y col., 2022; Palafox-González y col., 2023). Estos compuestos organosilícicos aumentan la dispersión del material en disolventes polares y mejoran su estabilidad debido al fuerte enlace que forman sus grupos funcionales hidrolizables con los grupos hidroxilo presentes en la superficie del $TiO_2$. Diversos agentes de acoplamiento han sido evaluados en diferentes aplicaciones; por ejemplo, el (3-aminopropil) trimetoxisilano (APTMS) ha demostrado mejorar la dispersión de partículas de $TiO_2$, el (3-glicidoxipropil) trimetoxisilano (GPTMS) ha sido empleado para funcionalizar $TiO_2$ e inmovilizar moléculas fotoactivas, mientras que el (3-cloropropil) trimetoxisilano (CPTMS) ha encontrado aplicaciones en ingeniería de tejidos debido a su capacidad para modificar superficies y mejorar la interacción entre materiales (Palafox-González y col., 2023). En el presente estudio se evalúa el comportamiento de composites de PP con cargas de $TiO_2$ funcionalizado con SCA (APTMS, CPTMS, GPTMS), frente a la exposición UV.

## 2. Metodología

### *2.1. Materiales*

Polipropileno (WA-Point 3D (China), incolora $\rho$=0.92 g/cm$^{3,}$ para impresión 3D FDM, 1.75 mm de diámetro). Dióxido de titanio ($TiO_2$) Sigma Aldrich, 99%). 3-aminopropiltrimetoxisilano (APTMS (A)), 97%, Sigma Aldrich ($\rho$=1.027 g/cm$^3$ (a 25 °C)). 3-cloropropiltrimetoxisilano (CPTMS (C)), 97%, Sigma Aldrich ($\rho$=1.090 g/cm$^3$ (a 25 °C)). 3-glicidoxipropiltrimetoxisilano (GPTMS (G)), 97%, Sigma Aldrich ($\rho$=1.070 g/cm$^3$ (a 25 °C)). Etanol Absoluto ≥99.8% Sigma Aldrich

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

*2.2. Equipos*

Extrusor de Filamento Wellzom. Sistema UV con lámparas con longitud de onda de 254 nm, 110~120 V 50/60 Hz.

*2.3. Equipos de caracterización*

FTIR-ATR Perkin 1600, modelo Spectrum 100.

*2.4. Procedimiento experimental.*

Los reactivos empleados fueron dióxido de titanio ($TiO_2$), etanol, polipropileno y un agente de acoplamiento silano (SCA) de funcionalización. La preparación del material consistió en la funcionalización del $TiO_2$, seguida de un proceso de extrusión y termoformado para obtener placas de polipropileno modificadas. Posteriormente, las placas se sometieron a irradiación ultravioleta (UV) en un sistema fotocatalítico para evaluar su degradación. Durante el experimento, se registraron parámetros como la temperatura, el volumen del sistema y los cambios físicos de los materiales.

*2.4.1. Preparación del material fotocatalítico.*

Se prepararon 5 g de $TiO_2$ y el agente de acoplamiento silano (APTMS, CPTMS, GPTMS) en proporción 1:1 en peso, (tomando en cuenta la densidad de cada uno de los SCA) en etanol absoluto, agitando constantemente a temperatura ambiente. Se evaporó el etanol durante 24 horas a 70 °C. Estos fueron pulverizados en un mortero de ágata, con el fin de reducir el tamaño de partícula y aumentar la homogeneidad del polvo.

*2.4.2. Obtención de hilos de composites de PP.*

Se alimentó una extrusora con 10 g de fragmentos de PP y 0.5% en peso de $TiO_2$ y sus diferentes funcionalizaciones ($TiO_2$-A, $TiO_2$-C, $TiO_2$-G). Durante la extrusión, el material fundido se recuperó en forma de hilo continuo, el cual se dejó enfriar a temperatura ambiente. El hilo se seccionó en fragmentos de aproximadamente 0.5 cm de longitud para facilitar su procesamiento.

*2.4.3. Elaboración de placas de polipropileno.*

Los fragmentos de hilo se fundieron sobre una parrilla de calentamiento. Se aplicó presión mediante placas metálicas, manteniendo el sistema a 100 °C (temperatura cercana a la temperatura de fusión del PP) durante un minuto para lograr la fusión y compactación del material. Tras el calentamiento, el conjunto se retiró de la

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

fuente de calor y se dejó enfriar por un minuto. Las placas resultantes se cortaron a dimensiones de 2 por 1 cm y se pesaron (0.1 g).

*2.4.4. Ensayo de fotocatálisis bajo radiación UV.*

El sistema fotocatalítico se acondicionó colocando 450 mL de agua en una probeta de radio de 5 cm y acoplando las lámparas de radiación UV de 254 nm. Tras verificar el funcionamiento del equipo, se introdujeron las placas modificadas en movimiento constante de 115 RPM, lo que equivale a una velocidad aproximada de 0.3 m/s. A lo largo del experimento se monitorearon periódicamente la temperatura, el volumen del sistema y la apariencia superficial de las placas, evaluando cualitativamente, así como también cuantitativamente, ya que, se pesaron las placas concluido el tiempo de exposición del material a la radiación UV.

*2.5. Composites*

La nomenclatura de los composites obtenidos se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Nomenclatura de los composites de PP extruidos con $TiO_2$ sin funcionalizar y funcionalizado con los agentes de acoplamiento silano (A, C, G).

| Nomenclatura | Descripción |
|---|---|
| PP | Polipropileno (puro) |
| PP-$TiO_2$ | Composite de PP con partículas de $TiO_2$ |
| PP-$TiO_2$-A | Composite de PP con partículas de $TiO_2$ funcionalizadas con 3-aminopropiltrimetoxisilano |
| PP-$TiO_2$-C | Composite de PP con partículas de $TiO_2$ funcionalizadas con 3-cloropropiltrimetoxisilano |
| PP-$TiO_2$-G | Composite de PP con partículas de $TiO_2$ funcionalizadas con 3-glicidoxipropiltrimetoxisilano |

## 3. Resultados y discusión

Se realizó la espectroscopía FT-IR usando el detector de reflexión total atenuado (FTIR-ATR Perkin, modelo Spectrum 100), a los materiales obtenidos después de realizar la modificación superficial 1:1 del $TiO_2$ con los alcoxisilanos (A, C, G), así como también a los composites de Polipropileno a los que se le agregaron el óxido metálico y sus diferentes modificaciones.

En la Figura 1 se muestra el espectro para los materiales de $TiO_2$ (sin y con modificación). Las bandas en $cm^{-1}$ que se observan a 540 y 683 $cm^{-1}$ pertenecen al enlace Ti-O-Ti, en cuanto a los compuestos de silano; A, C, G, las bandas aparecen en los rangos de 770-779 $cm^{-1}$ a (-$CH_2$ ρ / C-C ν), de 850-900 $cm^{-1}$ a (-Si-O-C ν), de 1030-1100 $cm^{-1}$ a (-Si-O-Si ν),

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

1240-1270 $cm^{-1}$ a (-Si-C ν), de 1380-1440 $cm^{-1}$ a (-C-O τ), 1580-1633 $cm^{-1}$ a (-$CH_2$ δ), de 2880-2970 $cm^{-1}$ a (-$CH_2$ $\nu_{si}$) y finalmente de 3400-3430 $cm^{-1}$ a (-O-H ν) (Ahangaran y col., 2020; Garcés-Giraldo y Rodríguez-Restrepo, 2004; Li y Zhao, 1999; Silva y Marques, 2025; Wanag y col., 2020; Zhao y col., 2012).

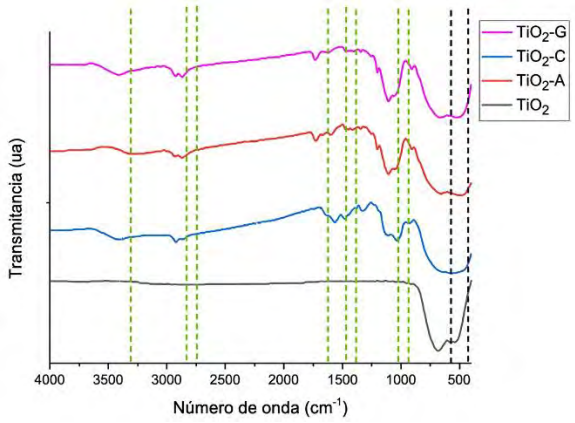



**Figura 1.** Espectros FT-IR de los materiales de $TiO_2$ modificados superficialmente con agentes de acoplamiento silano (A, C, G).

La Figura 2 muestra los espectros FT-IR para los 5 composites. Todos los materiales experimentan un proceso progresivo de fotooxidación durante la exposición a radiación UV, evidenciado por el incremento de la banda carbonilo (~1715-1730 $cm^{-1}$) y de las señales asociadas a grupos oxigenados en la región de 1000-1200 $cm^{-1}$. Así como también, las bandas características de metileno y metilo del polipropileno (2950–2838, 1455 y 1375 $cm^{-1}$) presentan modificaciones relacionadas con la escisión de cadenas y el avance de la degradación (Lee y Li, 2021; Lestari y col., 2022; Ohtani y col., 1989; Rothon, 2003; Silva y Marques, 2025; Xanthos, 2010).

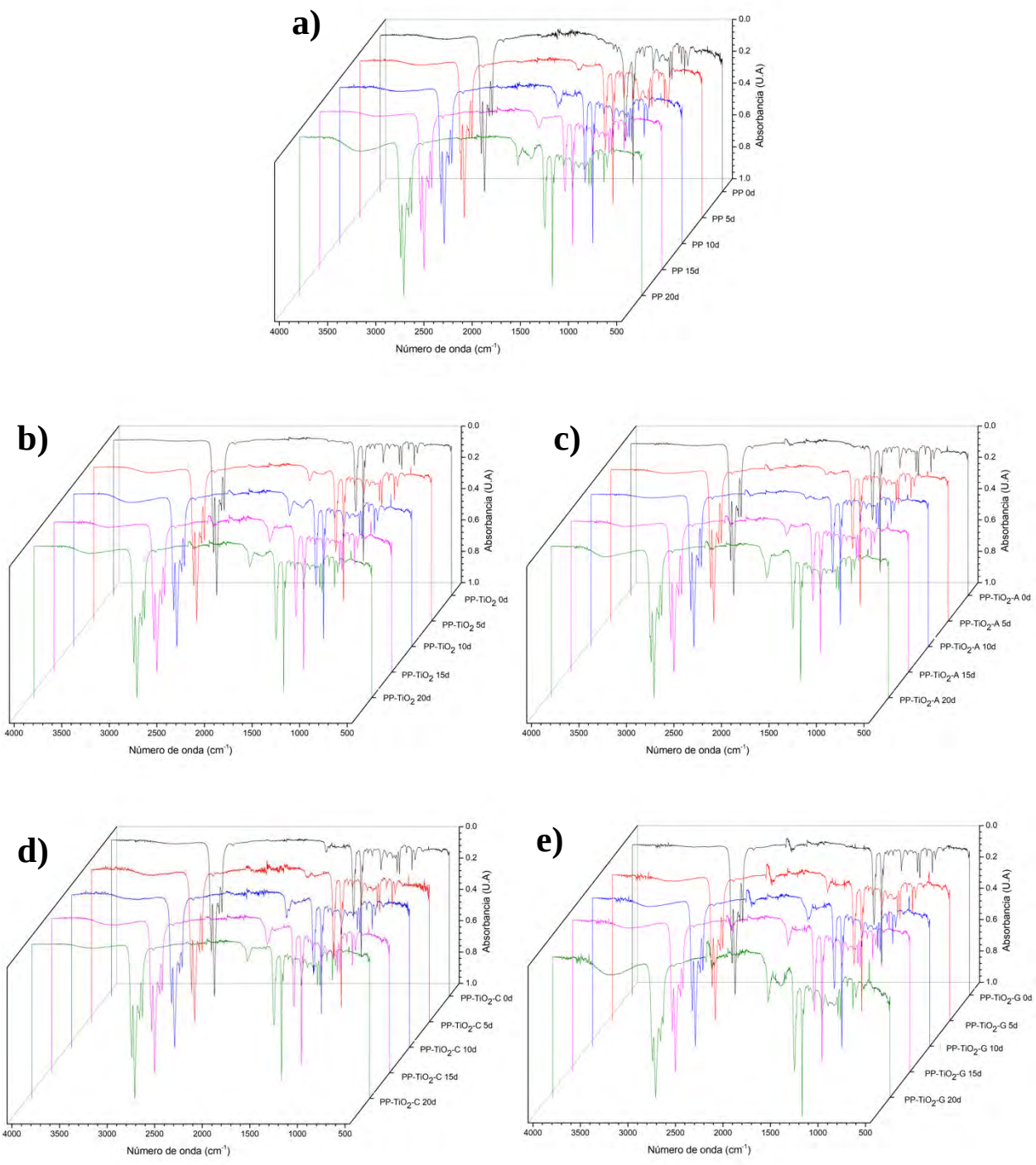



**Figura 2.** Espectros FT-IR de los composites de PP (a), con $TiO_2$ (b) y con $TiO_2$ modificado superficialmente con agentes de acoplamiento silano: A (c), C (d) y G (e).

Entre los sistemas evaluados, el PP puro exhibe los cambios espectrales más pronunciados, lo que indica una mayor susceptibilidad a la fotooxidación, ya que, la incorporación de $TiO_2$ reduce parcialmente la velocidad de degradación, mientras que los composites funcionalizados, particularmente PP-$TiO_2$-A y PP-$TiO_2$-C, muestran la menor acumulación de productos oxidados y una mejor conservación de la estructura química del polímero. Sin embargo, un composite que hay que resaltar es el de PP-$TiO_2$-G, pues presenta una evolución más marcada de las señales de oxidación, sugiriendo una menor estabilidad frente a la radiación UV.

En las Tablas 2 y 3 se muestra a detalle el análisis cuantitativo mediante el índice de carbonilo el cual, revela diferencias significativas entre los sistemas estudiados. Se usó la fórmula del índice de carbonilo (IC) (Almond y col., 2020):

$$IC = \frac{A_{1850-1650}}{A_{1500-1420}}$$

o de forma más explícita:

$$IC = \frac{Área\ de\ la\ banda\ carbonilo_{(1850-1650\ cm^{-1})}}{Área\ de\ la\ banda\ de\ referencia_{(1500-1420\ cm^{-1})}}$$

**Tabla 2.** Resultados del índice de carbonilo de los composites al tiempo inicial (0 días).

| Muestra | Área carbonilo (1850-1650 $cm^{-1}$) | Área referencia (1500-1420 $cm^{-1}$) | Índice carbonilo |
|---|---|---|---|
| PP | 6.4022 | 29.6461 | 0.2160 |
| PP-$TiO_2$ | 1.7529 | 14.8226 | 0.1183 |
| PP-$TiO_2$-A | 4.7318 | 17.8756 | 0.2647 |
| PP-$TiO_2$-C | 6.4428 | 16.2494 | 0.3965 |
| PP-$TiO_2$-G | 9.2036 | 19.1243 | 0.4813 |

**Tabla 3.** Resultados del índice de carbonilo de los composites al tiempo final (20 días) de exposición a la radiación UV.

| Muestra | Área carbonilo (1850-1650 $cm^{-1}$) | Área referencia (1500-1420 $cm^{-1}$) | Índice carbonilo |
|---|---|---|---|
| PP | 13.5493 | 20.5440 | 0.6595 |
| PP-$TiO_2$ | 14.2369 | 22.9323 | 0.6208 |
| PP-$TiO_2$-A | 5.5791 | 20.4083 | 0.2734 |
| PP-$TiO_2$-C | 8.5727 | 18.2535 | 0.4696 |
| PP-$TiO_2$-G | 38.0568 | 35.9377 | 1.0590 |

Finalmente se calculó la diferencia entre los sistemas del tiempo inicial y final (Tabla 4), a lo que se observa que los composites funcionalizados con APTMS (PP-$TiO_2$-A) y CPTMS (PP-$TiO_2$-C) presentan los valores más bajos de índice de carbonilo, indicando una menor formación de especies oxidadas y una mejor estabilidad fotoquímica frente a la irradiación UV. En contraste, el sistema PP-$TiO_2$-G exhibe el mayor índice de carbonilo, incluso superior al de PP y PP-$TiO_2$, lo que establece un proceso de fotooxidación más intenso.

**Tabla 4.** Diferencia del índice de carbonilo entre el tiempo inicial (t0) y el tiempo final (tf, 20 días) de exposición de los composites a la radiación UV.

| Composite | Δ Índice carbonilo (tf – t0) |
|---|---|
| PP | 0.4436 |
| PP-$TiO_2$ | 0.5026 |
| PP-$TiO_2$-A | 0.0087 |
| PP-$TiO_2$-C | 0.0732 |
| PP-$TiO_2$-G | 0.5777 |

Considerando tanto la evolución espectral como los valores del índice de carbonilo, se puede establecer que el orden de resistencia a la degradación fotooxidativa (Figura 3) es el siguiente: PP-$TiO_2$-A > PP-$TiO_2$-C > PP > PP-$TiO_2$ > PP-$TiO_2$-G, lo que nos indica que una funcionalización superficial con APTMS y CPTMS favorece la protección de la matriz de polipropileno, mientras que la modificación empleada en PP-$TiO_2$-G promueve una mayor acumulación de productos de oxidación durante la exposición a la radiación UV.

Con base en el comportamiento de los composites y las diferentes modificaciones del $TiO_2$, se observa que el comportamiento fotooxidativo se debe a la naturaleza química de los grupos funcionales de cada silano y su efecto sobre el óxido metálico. Los grupos amino (-$NH_2$) del APTMS (A) y los de cloro (-Cl) del CPTMS mejoran la dispersión del $TiO_2$ sobre la matriz polimérica, así como también se muestran como agentes de bloqueo fotocatalítico, actuando como inhibidores a la degradación, debido a las especies reactivas de oxígeno (ROS) (Garcés-Giraldo y Rodríguez-Restrepo, 2004). Por el contrario, el grupo epoxi del GPTMS (G), presenta una apertura de anillo debido a la radiación UV, generando radicales hidroxilo que actúan en conjunto con el $TiO_2$, acelerando la degradación del polímero y la acumulación de productos de oxidación, mismos que son visibles en los espectros de IR (Lee y Li, 2021; Lestari y col., 2022).

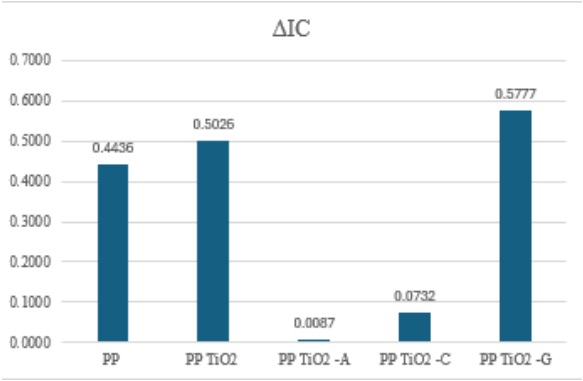



**Figura 3.** Diferencia del índice de carbonilo entre el tiempo inicial y el tiempo final.

La Figura 4 muestra la variación del porcentaje de la pérdida de masa de las muestras de polipropileno modificadas con los diferentes alcoxisilanos durante la exposición a radiación UV a distintos tiempos de envejecimiento. Se observa un

comportamiento dependiente del tiempo de exposición, donde las muestras presentan cambios progresivos conforme aumenta el periodo de irradiación.

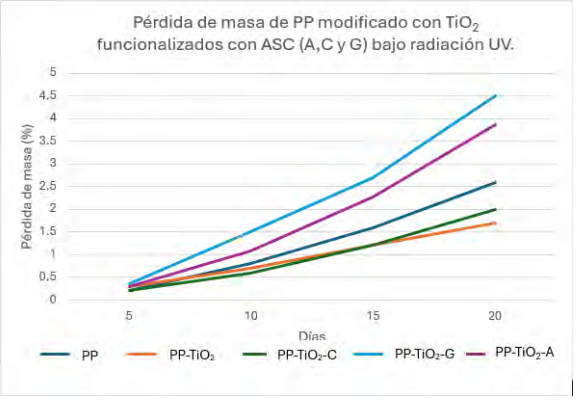



**Figura 4.** Porcentaje de pérdida de masa del polipropileno modificado con diferentes alcoxisilanos después de la exposición a radiación UV.

## 4. Conclusiones

El análisis realizado permitió establecer que la funcionalización superficial del dióxido de titanio ($TiO_2$) con agentes de acoplamiento silano influye de manera determinante en el comportamiento fotooxidativo de los composites de polipropileno expuestos a radiación ultravioleta. El análisis mediante espectroscopía FTIR y la diferencia de índice de carbonilo (Δ IC) evidenció que los composites funcionalizados con APTMS (0.0087) y CPTMS (0.0732) presentaron una menor formación de productos de oxidación y, por consiguiente, una mayor estabilidad frente al envejecimiento fotooxidativo, mientras que la funcionalización con GPTMS (0.5777) favoreció un proceso de degradación más acelerado. Estos hallazgos confirman que la selección del agente de funcionalización permite modular la estabilidad y el tiempo de vida útil del material de acuerdo con la aplicación deseada, ya sea para incrementar su resistencia en condiciones de exposición ambiental o para promover una degradación controlada que contribuya a disminuir la acumulación de residuos plásticos. En conjunto, este estudio aporta información relevante para el diseño y desarrollo de composites poliméricos con propiedades específicas y sienta las bases para futuras investigaciones orientadas a evaluar su desempeño mecánico, térmico y ambiental.

## Referencias bibliográficas

Ahangaran, F., Navarchian, A. H., y Picchioni, F. (2020). Recent advances in chemical surface modification of metal oxide nanoparticles with silane coupling agents: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 286, 102298. https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102298

Almond, J., Sugumaar, P., Wenzel, M. N., Hill, G., y Wallis, C. (2020). Determination of the carbonyl index of polyethylene and

polypropylene using specified area under band methodology with ATR-FTIR spectroscopy. *e-Polymers*, 20(1), 369-381. https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0041

Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596-1605. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030

Borrelle, S. B., Rochman, C. M., Liboiron, M., Bond, A. L., Lusher, A., Bradshaw, H., y Provencher, J. F. (2020). Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science*, 369(6510), 1515-1518. https://doi.org/10.1126/science.aba3656

Chen, X., y Mao, S. S. (2007). Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications, and applications. *Chemical Reviews*, 107(7), 2891-2959. https://doi.org/10.1021/cr0500535

Garcés-Giraldo, L. F., y Rodríguez-Restrepo, A. (2004). Evaluación de la fotodegradación sensibilizada con $TiO_2$ y $Fe^{3+}$ para aguas coloreadas. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(2), 54-60.

Huang, Y., Tian, M., Jin, F., Wang, M., y Pan, Y. (2022). Photocatalytic degradation of (micro)plastics using $TiO_2$-based and other catalysts: Properties, influencing factors, and mechanism. *Journal of Environmental Management*, 307, 114533. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114533

Karger-Kocsis, J. (Ed.). (1995). *Polypropylene: Structure, blends and composites*. Chapman & Hall.

Lee, Q. Y., y Li, H. (2021). Photocatalytic degradation of plastic waste: A mini review. *Micromachines*, 12(8), 907. https://doi.org/10.3390/mi12080907

Lestari, P., Trihadiningrum, Y., y Warmadewanthi, I. (2022). Simulated degradation of low-density polyethylene and polypropylene due to ultraviolet radiation and water velocity in the aquatic environment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107553. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107553

Li, X. Z., y Zhao, G. H. (1999). Advanced treatment of dyeing wastewater for reuse. *Water Science and Technology*, 39(10-11), 249-255.

Massardier, V., y Louizi, M. (2015). Photodegradation of a polypropylene filled with lanthanide complexes. *Polímeros*, 25(6),

515-522. https://doi.org/10.1590/0104-1428.1864

Ohtani, B., Nishimoto, S., Kagiya, T., y Sakamoto, M. (1989). Photocatalytic degradation of polypropylene film by dispersed titanium dioxide particles. *Polymer Degradation and Stability*, 23(3), 271-278. https://doi.org/10.1016/0141-3910(89)90101-8

Palafox-González, P., Rosas-Orta, L. R., Contreras-López, D., Rocha-Jiménez, J., González-Zárate, D., Pawar, T., Delgado-Alvarado, E., Alegría-Torres, J., y Vallejo-Montesinos, J. (2023). Study of the photodegradation of polypropylene: Effect of the silane coupling agents as organosilicon coatings in $TiO_2$ fillers, evaluation of the thermomechanical properties. *Polymer Degradation and Stability*, 216, 110481. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110481

PlasticsEurope. (2024). *Plastics - The fast facts 2024*. https://plasticseurope.org

PlasticsEurope. (2025). *Plastics - The fast facts 2025*. https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2025

Rothon, R. N. (Ed.). (2003). *Particulate fillers for polymers* (2a ed.). Smithers Rapra.

Silva, D. B., y Marques, A. C. (2025). $TiO_2$-based photocatalytic degradation of microplastics in water: Current status, challenges and future perspectives. *Journal of Water Process Engineering*, 72, 107465. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107465

Wanag, A., Rokicka-Konieczna, P., Kusiak-Nejman, E., Kapica-Kozar, J., Morawski, A. W., y Tryba, B. (2020). Influence of modification of titanium dioxide by silane coupling agents on the photocatalytic activity and stability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103917. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103917

Xanthos, M. (Ed.). (2010). *Functional fillers for plastics* (2a ed.). Wiley-VCH.

Zhao, L., He, J., Wang, T., y Chen, J. (2012). Surface modification of $TiO_2$ nanoparticles with silane coupling agents. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 413, 273-279. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.08.041