

Fotodegradación acelerada de polímeros

José Andrés Alanís-Navarro,^{1*} Grecia María Aguilar-Armenta,² Cynthia Paola Gutiérrez-Castellanos,² Danna Paola Ríos-Abarca,² María Adriana García-López¹

¹ Laboratorio de Ecotecnologías, Universidad Politécnica del Estado de Guerrero, Carretera Federal Iguala-Taxco km 105, Puente Campuzano, 40321, Taxco de Alarcón, Guerrero, México.

² Ingeniería en tecnología ambiental, Universidad Politécnica del Estado de Guerrero, Carretera Federal Iguala-Taxco km 105, Puente Campuzano, 40321, Taxco de Alarcón, Guerrero, México.

* Autor de correspondencia: aalanis@upeg.edu.mx

Resumen

En este artículo se presentan resultados preliminares de la degradación acelerada de polímeros utilizando radiación solar concentrada. Para ello se diseñó un prototipo de concentración solar pasivo, que consta de cuatro espejos trapezoidales colocados de forma de pirámide cuadrada truncada invertida. Los espejos están colocados a un ángulo de 30° respecto al cenit. El prototipo tiene una base cuadrada de 46 cm x 46 cm donde se colocan los polímeros a irradiar y una razón de concentración geométrica, CRg de 1.89. Se determinó el cambio de masa después de 30 días de exposición a la radiación solar, y se obtuvo la variación de la temperatura de algunas muestras en función de la irradiancia. De manera complementaria, se realizó una simulación por computadora utilizando el programa de acceso libre Energy2D. Algunos polímeros mantuvieron sus propiedades mecánicas de flexibilidad, como el PET (tipo 1), otros se fragilizaron parcialmente, mientras que los polímeros tipo 2, 5 y 7 se fragilizaron completamente. Se logró reducir el tiempo de degradación de distintos tipos de polímeros comerciales, mientras que los polímeros expuestos a radiación no concentrada y sin exposición, permanecen intactos. Los polímeros fragilizados se pueden utilizar como material impermeable en losas y en muros pre-colados, así como en aplicaciones donde no tengan exposición a la radiación solar. Por otra parte, los polímeros que permanecieron intactos, se deben utilizar en aplicaciones de exposición permanente a la radiación, como en macetas, piezas plásticas para automóviles, etc.

Palabras clave: polímeros, fotodegradación, concentración solar, Energy2D.

La fotodegradación, además de afectar la constitución física de los polímeros utilizados en aplicaciones industriales y cotidianas, también puede tener implicaciones ambientales, ya que los polímeros sin un tratamiento de manejo adecuado pueden liberar sustancias nocivas en el medio ambiente y contribuir a la acumulación de residuos (Macías et al., 2018). En este trabajo presentamos una alternativa para acelerar el proceso natural de fotodegradación de polímeros de un solo uso (p. ej. botellas de bebidas, recipientes de alimentos lácteos, etc.), utilizando radiación solar concentrada. El estudio de fotodegradación se realizó en un concentrador solar tipo pirámide truncada invertida, permite cuantificar la tolerancia de los polímeros a la radiación solar. Se observó que el cambio en la masa y resistencia mecánica de las muestras dependen de la calidad y naturaleza de los polímeros. La fotodegradación de polímeros es una alternativa sostenible y esencial dentro de las tecnologías de tratamiento de residuos. El uso de materiales según su aplicación final y resistencia mecánica, es una característica a considerar en los polímeros más resistentes a la radiación en donde se requiere, o promover el uso de los polímeros que presentan una degradación en un menor tiempo, en los plásticos de un solo uso.

Introducción

La fotodegradación de polímeros es un fenómeno importante en la ciencia de los materiales y la química ambiental. Los polímeros, pueden ser naturales o sintéticos y constituyen una amplia gama de materiales y usos utilizados en numerosas aplicaciones industriales y cotidianas, lo cuales pueden sufrir transformaciones químicas y físicas cuando están expuestos a la radiación solar o fuentes de radiación ultravioleta (Yousif et al., 2023) Este proceso de fotodegradación puede alterar las propiedades y la estructura de los polímeros, lo que a su vez puede influir en su durabilidad, elasticidad, resistencia y vida útil. La interacción de la radiación solar con los enlaces químicos de los polímeros puede provocar la ruptura de cadenas moleculares, la formación de grupos funcionales y la reducción de las propiedades mecánicas y térmicas del material.

Marco teórico

La fabricación y uso de productos de consumo conllevan a la generación de diversos tipos de desechos. Estos pueden ser representados de tres maneras distintas: i) sólidos orgánicos e inorgánicos, ii) líquidos que se disuelven y forman parte de las aguas residuales, y iii) los que son liberados en forma de gases al medio ambiente. Los residuos sólidos urbanos son aquellos desechos o desperdicios que comúnmente encontramos en los espacios productivos y cotidianos como consecuencia de las actividades domésticas (envases, embalajes o empaques, o materia orgánica).

La importancia de la gestión adecuada de estos desechos no solamente radica en el uso racional de los recursos naturales, también es una cuestión de cantidad y de la composición de los residuos y lo que se hace para minimizar los riesgos de salud y ambientales (Macías et al., 2018). Los polímeros pueden clasificarse en naturales y sintéticos, generalmente son compuestos orgánicos de gran importancia en la industria debido a sus propiedades versátiles y su capacidad para ser moldeados en diferentes formas. Sin embargo, su producción, uso y disposición inadecuada pueden tener un impacto significativo en el medio ambiente, como la contaminación del agua y el suelo, la degradación de ecosistemas y la amenaza para la salud humana y la biodiversidad. Uno de los grandes problemas con el uso excesivo y mal manejo de los polímeros como desechos, es el impacto en la salud por la presencia de microplásticos en las aguas y en especies de consumo humano (Valdivia et al., 2023). El reciclaje de polímeros es una estrategia clave para mitigar el impacto ambiental ocasionado por los desechos plásticos. Dentro de las técnicas más utilizadas para su tratamiento, son: i) la incineración de residuos, en este proceso son sometidos a altas temperaturas en incineradores controlados. Este método puede reducir significativamente el volumen de los residuos y generar energía térmica o eléctrica; ii) la trituración de plásticos es una etapa clave en el proceso de reciclaje mecánico. La trituración reduce el tamaño de los materiales para facilitar la manipulación y transformación en materias primas secundarias, aunque esta técnica requiere de una gran cantidad de energía eléctrica. En el caso de la incineración presenta desafíos ambientales, ya que, se liberan gases y partículas durante la combustión que causan daños atmosféricos. La elección adecuada de tecnologías de tratamiento de residuos es crucial para asegurar una gestión eficiente y sostenible de los materiales reciclables (Chacón et al., 2016).

Metodología

Se diseñó un prototipo fototérmico que aprovecha la radiación solar concentrada para acelerar el proceso de fotodegradación de polímeros. El diseño consta de una base cuadrada de 46 cm x 46 cm, cuatro espejos de forma trapezoidal A x B x C x D de (44 x 47 x 44 x 87) cm, a 30° respecto al cenit, colocados en las paredes de un prisma cuadrado truncado invertido. El área de apertura (AAp.) y el área de absorción (AAb.) son de 87 cm y 46 cm, respectivamente (Ochieng & Oyango, 2008). Con esta información se determina la razón de concentración geométrica, $CR_g = AAp./AAb.$, $CR_g = 1.89$. En el diagrama de bloques de la Figura 1, se presentan las etapas del desarrollo de este estudio. Se inicia con el diseño en el programa de acceso libre de diseño asistido por computadora, FreeCAD (FreeCAD, 2023).

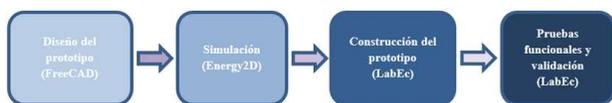


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de diseño, simulación y pruebas experimentales.

Posteriormente se realiza la simulación del comportamiento térmico del sistema empleando el programa de acceso libre Energy2D (Energy2D, 2023; Xie, 2012). Para la simulación se consideran los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación, así como la convección de masa, y se utilizan las propiedades térmicas y ópticas de los materiales utilizados reportados previamente (Alanís et al., 2019; Alanís et al., 2020). En la Figura 2 se muestran el diseño realizado en FreeCAD, la localización física de los parámetros geométricos de apertura de absorción y apertura, además del prototipo fabricado.

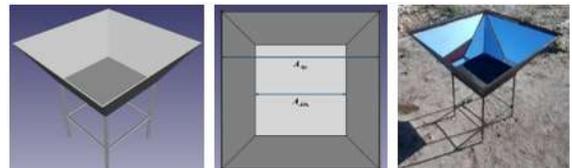


Figura 2. Diseño del prototipo utilizando FreeCAD (izquierda); vista superior donde se muestran el área de apertura y de absorción (centro); fotografía del prototipo construido en el Laboratorio de Ecotecnologías, LabEc de la UPEGro (derecha).

Para caracterizar el recurso solar se utilizó un solarímetro (SM-206). La distribución de la temperatura del absorbedor se registró mediante imágenes térmicas obtenidas con una cámara termográfica Flir E5. De esta manera se logra hacer un estudio preciso de la distribución de temperatura del absorbedor en las horas de exposición a la radiación solar. Los valores de temperatura de los polímeros se obtuvieron mediante la aplicación FLIR Tools, la cual permite importar, editar y analizar las imágenes fototérmicas para interpretar y estudiar la temperatura de las muestras. Por su parte, para identificar los cambios en los polímeros por la acción solar acelerada, se mide el cambio de la masa expresada como un delta de masa (Δm), ya que por procesos de oxidación algunos polímeros generan gases que modifican la masa de las muestras. Para determinar la masa de las muestras de polímeros se utiliza una balanza analítica de precisión Ohaus AX224.

Resultados

El tiempo de duración del experimento fue de 30 días, del 4 de julio al 3 de agosto del año 2023. Cabe mencionar que la experimentación se realizó en condiciones reales de lluvia, nubosidad, viento, etc. Al día 14 del experimento, los polímeros M2, M6 y M17 comenzaron a fracturarse, mientras que las muestras M3, M10 y M12, presentaron signos de fractura al día 21 del experimento.

La tabla completa con la información de las muestras que se fracturaron, se presenta en el Anexo A. Para determinar el comportamiento térmico y el efecto de la geometría del concentrador solar se realizó un diseño en Energy2D.

En cuanto al análisis experimental del funcionamiento del prototipo consistió en una simulación por computadora y una comparativa con mediciones realizadas utilizando una cámara termográfica Flir E5, y con un post-procesamiento de las imágenes térmicas con la ayuda de la aplicación Flir Tools para dispositivo inteligente.

Posteriormente se realizaron simulaciones del calentamiento de tres muestras de polímero colocadas sobre la superficie de la base, denotadas TM1, TM2 y TM3. Se analizó el efecto de calentamiento por absorción de radiación solar que incide sobre los polímeros, considerando su coeficiente de absorción de cada material (Alanís et al., 2019). En la Figura 4 se muestra un corte transversal de la simulación del prototipo, la transferencia y distribución térmica se representa por las flechas de flujo de calor, isotermas y líneas de corriente.

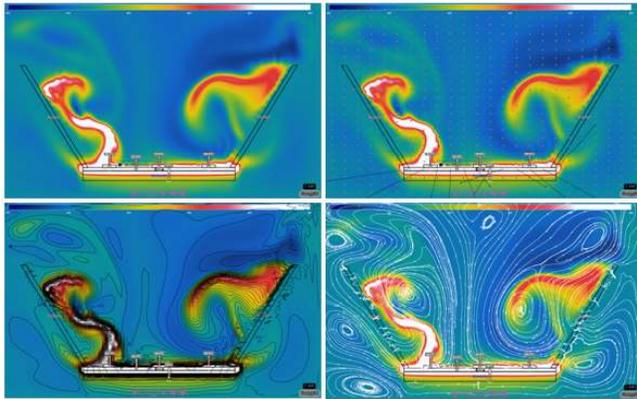


Figura 4. Simulación de la absorción de radiación en las muestras. Convección natural de calor y masa (arriba-izquierda); convección natural mostrando las flechas de calor (arriba-derecha); isotermas (abajo-izquierda); y líneas de corriente (abajo-derecha).

Para evaluar la influencia del ángulo de incidencia en la absorción de calor sobre las muestras, se realizaron simulaciones con ángulos de incidencia de 60°, 70°, 80° y 90° (i.e., 9 h, 10 h, 11 h y 12 h) para la muestra TM2. Los resultados de este análisis se presentan en la gráfica de la Figura 5. Se aprecia la influencia del ángulo de incidencia (asociado directamente a la hora del día) con el incremento de temperatura de las muestras.

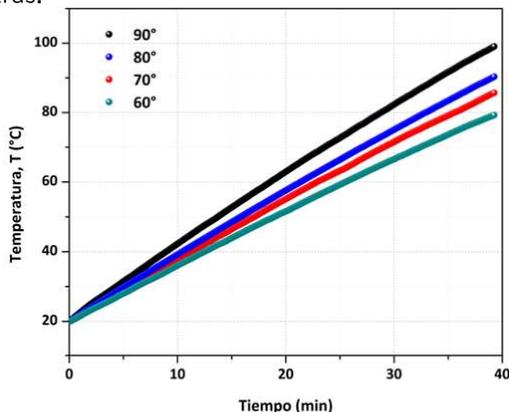


Figura 5. Variación de la temperatura de una pieza plástica colocada en el centro de la base. Se observa la influencia del ángulo de incidencia de la radiación solar en la temperatura de la muestra.

El estudio teórico respecto al efecto del ángulo de incidencia solar sobre los polímeros, proporcionó una base cuantitativa sobre la velocidad de calentamiento por absorción y el horario de exposición solar más adecuado para el proceso de fotodegradación, para favorecer el efecto fisicoquímico en los diferentes polímeros bajo estudio.

Análisis termográfico

En la Figura 6 se presentan dos imágenes térmicas, a la izquierda se observa la distribución de la temperatura correspondiente a las 9:06 h, la zona azul es la de menor temperatura de esa imagen (i.e., 36.9 °C), se aprecia que la radiación solar aún no incide de manera homogénea sobre la superficie. A la derecha de esa misma imagen, se aprecia una mejor distribución de la temperatura, y se observa que la mayor temperatura asciende a 92.3 °C, siendo notorio el efecto de la radiación solar concentrada.



Figura 6. Imágenes térmicas del día 4 de julio de 2023; fotografía tomada a las 9:06 h (izquierda) y a las 13:44 h (derecha).

También se analizó el calentamiento de algunas muestras por el efecto de la absorción de la radiación solar en función del tiempo. En la Figura 7 se muestra la gráfica representativa de este proceso correspondiente al día 8 de agosto de 2023 de la muestra M18, un plástico tipo 2, considerando la irradiancia solar y la temperatura de la muestra. En el Anexo B se muestra el reporte de medición obtenido mediante la aplicación Flir Tools, en donde se obtienen mediciones puntuales sobre superficies específicas de las imágenes térmicas.

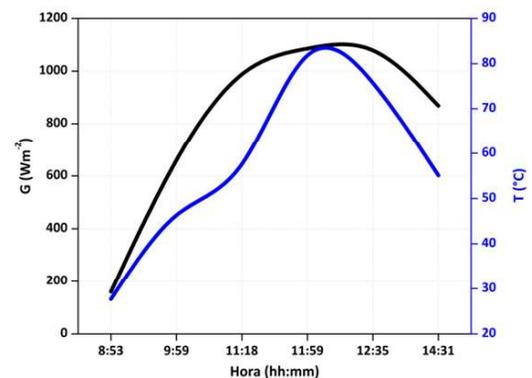


Figura 7. Variación de la irradiancia solar y la temperatura de una muestra expuesta a la radiación.

Fotodegradación

Como parámetro de referencia se determinó el cambio de masa de cada muestra, al inicio y fin del experimento, esta información se presenta en la Figura 8. Se observa que la muestra M1, es la que presenta el mayor cambio de masa, probablemente sea debido a la decoloración de la muestra. Algunas muestras no presentaron cambio de masa (i.e., M6, M9 y M14). De manera similar se realizó una valoración semi-cuantitativa de la fragilidad de los polímeros después de la exposición a la radiación solar. El 50% de las muestras se fragilizaron completamente al tacto; el 44% de las muestras no mostraron fragilidad, y el 4% se fragilizaron parcialmente.

Conclusiones

Se presenta un estudio preliminar de la degradación acelerada de distintos tipos de polímeros comerciales utilizando radiación solar concentrada, para lo cual se diseñó y fabricó un dispositivo pasivo de concentración solar de razón de concentración geométrica $CR_g = 1.89$. El análisis teórico del efecto del ángulo de incidencia de la radiación solar sobre los polímeros, brinda una base cuantitativa acerca de la rapidez de calentamiento y el horario de exposición solar idóneo que favorece y acelera el proceso de fotodegradación. En este sentido, después de las 9:00 h, los espejos colocados a 30° respecto al cenit, realizan su función de proyectar la radiación sobre las muestras a degradar, aun cuando el prototipo que se presenta no tiene un sistema de seguimiento solar. Se observa que el 50% de las muestras expuestas a la radiación solar concentrada presentaron una fractura total, mientras que el 44%, se mantuvieron intactos en un análisis visual y de prueba semi-cuantitativa de fractura mecánica, el resto presentó fractura parcial. Algunos polímeros sufrieron decoloración y otros se quemaron parcialmente. Los tipos de plástico que presentaron una mayor foto-degradación y fractura son los del tipo 2, 5 y 7. Los plásticos del tipo 1 y 3, no presentaron signos de fractura y su coloración se mantuvo sin cambios significativos. Es fundamental utilizar los materiales según su aplicación final, entre otros aspectos, su duración en el corto, mediano o largo plazo. La resistencia mecánica es una característica importante a considerar en los polímeros expuestos permanentemente a la radiación solar. Asimismo, el conocimiento de su comportamiento ante la radiación solar, permite promover el uso de los polímeros que presentan una degradación en un menor tiempo, como los plásticos 2, 5 y 7, en los envases desechables.

Referencias

- Alanís Navarro J.A., et al., (2020). Diseño y fabricación de un destilador solar híbrido fototérmico-fotovoltaico para zonas rurales. Foro de Estudios Sobre Guerrero, Vol. 8, No. 1, 301-305.
<https://revistafesgro.cocytieg.gob.mx/index.php/revista/article/view/113/70>
- Alanís Navarro J.A., et al., (2019). Computational thermal analysis of a double slope solar still using Energy2D. Desalination and Water Treatment, 151, 26-33.
<http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2019.23811>
- Chacón et al., (2016). Tendencia del crecimiento en la cultura del reciclaje. Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales, (2) 63-72.
https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales/vol2num5/Revista_de_Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales_V2_N5_7.pdf
- Energy2D (2023). Energy2D, The Concord Consortium. Recuperado el 12 de agosto de 2023, de <http://energy.concord.org/energy2d/>
- FreeCAD (2023). FreeCAD: Your own 3D parametric modeler. Recuperado el 12 de agosto de 2023: <https://www.freecad.org/>
- Macías, L. M., Páez Bernal, M. A., & Torres Acosta, G. (2018). La Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos. Tesis de maestría, Centro de Investigación de Información Geoespacial, AC, CentroGeo, CONACYT.
- Ochieng R.M., Onyango F.N. (2008). The importance and effect of configurational geometry in the design and application of solar collectors and concentrators with reference to compound parabolic concentrators (CPCs and cones. IJEEE, Vol. 12, Issue 2/3, pp. 1-24.
- Valdivia R.S., García C.U., Pacheco L. N. (2023). Microcontaminantes en la península de Yucatán. Revista – Divulgación de Ciencia y Educación, Vol. 1, No. 2, pp. 37-38.
<https://redicve.upeg.edu.mx/2023/09/20/microcontaminantes-en-la-peninsula-de-yucatan/>
- Yousif, E., et al. (2023). Photo-physical and Morphological Study of Polymers: A Review. Physical Chemistry Research, 11(2), 409-424. doi: 10.22036/pcr.2022.342751.2105.
https://www.physchemres.org/article_154572.html
- Xie C. (2012). Interactive Heat Transfer Simulation for Everyone, The Physics Teacher, Vol. 50, Issue 4, pp. 237-240.
<https://doi.org/10.1119/1.3694080>