

Obtaining nanocomposites based on recycled polystyrene from urban solid waste with carbon nanostructures: graphene oxide and multi-wall carbon nanotubes, modified with organic acids

J.E. de la Peña-González¹, J.J. Cedillo-Portillo¹, R.I. Narro-Cespedes¹,
A.O. Castañeda-Facio¹, A. Sáenz-Galindo^{1*},

¹Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Blvd. Venustiano Carranza
y José Cárdenas Valdés. C.P. 25280, Saltillo Coahuila, México

Obtención de Nanocompuestos a base de Poliestireno Reciclado de Residuos Sólidos Urbanos con Nanoestructuras de Carbono: Óxido de Grafeno y Nanotubos de Carbono de Pared Múltiple, Modificados con Ácidos Orgánicos

Obtenció de nanocompostos a base de poliestirè reciclat de residus sòlids urbans amb nanoestructures de carboni: òxid de grafè i nanotubs de carboni de paret múltiple, modificats amb àcids orgànics

RECEIVED: 26 JUNE 2020; ACCEPTED: 12 MARCH 2021 [HTTPS://DOI.ORG/10.55815/422405](https://doi.org/10.55815/422405)

ABSTRACT

The excessive use of polystyrene has caused great environmental problems at a global level, an alternative to reduce this problem is recycling, in order to obtain new products from waste, so the objective of this manuscript is to obtain nanocomposites (NCs) from recycled polystyrene with the integration of graphene oxide (OG) and multiple walled carbon nanotubes (NTCPM) previously modified with benzoic acid at concentrations of 0.33 and 5% respectively. Low toxicity solvent was used. The materials obtained were characterized by infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis (TGA) and light microscopy, finding by FTIR that the chemical structure of the polystyrene was not affected after the integration of the nanostructures and processing, which suggests that they are maintained the properties, regarding the optical micrographs, it can be observed that the NCs with the modified nanostructures presented a homogeneous dispersion, with respect to the thermogravimetric analysis, they increased 27 ° C in thermal stability.

Key words: Benzoic acid, carbon nanotubes, graphene oxide, recycled polystyrene, ultrasound.

RESUMEN

El uso desmedido del poliestireno ha causado grandes problemáticas ambientales a nivel global. Una alternativa para abatir esta problemática es el reciclaje, con el fin de obtener nuevos productos a partir de residuos, por lo que el objetivo del presente manuscrito es la obtención de nanocompuestos poliméricos (NCs) a partir de poliestireno reciclado con la integración de óxido de grafeno (OG) y nanotubos de carbono de pared múltiple (NTCPM) previamente modificados con ácido benzoico con la finalidad de proporcionar una superficie más afin de la nanoestructura al polímero, concentraciones del 0.33 y 5% respectivamente. Se trabajó con disolvente de baja toxicidad. Los materiales obtenidos se caracterizaron mediante espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), análisis termogravimétrico (TGA) y microscopia óptica, encontrando mediante FTIR que no se vio afectada la estructura química del poliestireno después de la integración de las nanoestructuras y del procesamiento. Lo cual sugiere que se mantienen las propiedades, en cuanto a las micrografías ópticas. Se observa que los NCs con las nanoestructuras modificadas presentaron una dispersión homogénea, con respecto al



*Corresponding author: aidesaenz@uadec.edu.mx

anàlisi termogravimètric se incrementaron 27 °C en estabilitat tèrmica.

Palabras clave: Àcid benzoic, nanotubos de carbono, òxid de grafè, poliestireno reciclat, ultrasonido.

RESUM:

L'ús desmesurat del poliestirè ha causat grans problemàtiques ambientals a nivell global. Una alternativa per abatre aquesta problemàtica és el reciclatge, per tal d'obtenir nous productes a partir de residus, de manera que l'objectiu del present manuscrit és l'obtenció de nanocompostos polimèrics (NCs) a partir de poliestirè reciclat amb la integració d'òxid de grafè (OG) i nanotubos de carboni de paret múltiple (NTCPM) prèviament modificats amb àcid benzoic amb la finalitat de proporcionar una superfície més afi de la nanoestructura al polímer, concentracions de 0.33 i 5% respectivament. Es va treballar amb dissolvent de baixa toxicitat. Els materials obtinguts es van caracteritzar mitjançant espectroscòpia infraroja amb transformada de Fourier (FTIR), anàlisi termogravimètrica (TGA) i microscòpia òptica, trobant mitjançant FTIR que no es va veure afectada l'estructura química del poliestirè després de la integració de les nanoestructures i del processament. La qual cosa suggereix que es mantenen les propietats, pel que fa a les micrografies òptiques. S'observa que els NCs amb les nanoestructures modificades van presentar una dispersió homogènia, pel que fa a l'anàlisi termogravimètric es van incrementar 27 °C en estabilitat tèrmica.

Paraules clau: Àcid benzoic, nanotubos de carboni, òxid de grafè, poliestirè reciclat, ultrasò.

INTRODUCTION

En el año 2015, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, en ella se presenta a los países y sus sociedades, la oportunidad de emprender un camino hacia la mejora de la vida de todos, en la agenda se plantean 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales señalan la ruta a seguir para combatir las principales problemáticas mundiales actuales, como lo son; la eliminación de la pobreza, el combate al cambio climático, la educación, la igualdad de la mujer, la defensa del medio ambiente o el diseño de nuestras ciudades¹.

No solamente la ONU ha presentado alternativas para la solución de estas problemáticas, movimiento como Carta de a Tierra, también plantean una serie de medidas a seguir, si bien las problemáticas mundiales actuales son varias y muy diversas, algunas en las cuales se ha puesto especial atención son, el cuidado al medio ambiente, y el combate al cambio climático².

La contaminación generada por residuos sólidos urbanos, es una de las principales causas de incremento

de contaminantes, así como de una gran producción de gases de tipo invernadero, es por ello que se han buscado mediadas que permitan una disminución de la acumulación de residuos sólidos urbanos en los diversos centros de recolección, entre estas medidas destaca una fuerte campaña ambiental que promueve la reutilización de residuos, como los son los residuos plásticos o poliméricos, entre estos residuos plásticos, destaca el poliestireno, ya que es uno de los principales plásticos usados de manera cotidiana en diversas aplicaciones, siendo la más común el traslado y envasado de alimentos.

El uso desmedido del poliestireno en diversas aplicaciones como el envasado y traslado de alimentos, ha causado grandes problemas ambientales, ya que se ha encontrado que forma parte de los principales plásticos presentes en los océanos³. Lo que ha causado grandes estragos en la fauna que habita en esos ecosistemas, pues se ha demostrado que afecta el metabolismo en algunos peces y crustáceos⁴⁻⁵. Una alternativa para disminuir la presencia de este contaminante en el medio ambiente es el reciclaje, con el fin de crear nuevos productos o materiales a partir de este tipo de residuos⁶.

El poliestireno es un polímero aromático no conductor, de gran estabilidad, tiene un punto de fusión arriba de 100 °C, y no se degrada; se forma a través de la polimerización de estireno. Entre sus características se encuentra la solubilidad en disolventes aromáticos, y una temperatura de transición vítrea de 74 °C. Es ampliamente usado para la producción de CDs, juguetes, cepillos de dientes, así como también para la producción de poliestireno expandido el cual es usado para la producción de envases alimenticios de un solo uso, como bandejas, platos, vasos etc⁷.

Hasta enero de 2019, la producción mundial de plásticos, principalmente estireno se llevaba a cabo en tres principales zonas globales: por un lado, China lideraba la producción mundial aportando un 29.4% de la producción total; en segundo lugar, Europa, con una producción del 18.5%, y, en tercer lugar, el TLCAN, donde México, Canadá y Estados Unidos, juntos aportaban una producción anual del 17.7%⁸.

Los NCs son definidos como un material formado por nanoestructuras o materiales a nivel nanoescala integrados en una matriz la cual puede ser de origen metálica, cerámica o polimérica, son un sistema de múltiples fases, que pueden mejorar las propiedades de la matriz en la cual se introducen⁹.

Por otra parte, el óxid de grafè (OG) y los nanotubos de carbono de paret múltiple (NTCPM) son nanoestructuras a base de carbono, por lo que sus estructuras están principalmente formadas por enlaces sp^2 y sp^3 , lo que los vuelve materiales ampliamente conductores, por lo que pueden ser empleados en una gama de aplicaciones que van desde la industria eléctrica, electrónica, medicina, hasta la electroquímica¹⁰.

Wang y col. (2019)¹¹, reportan la síntesis de NTCPM modificados con nanopartículas de ácido 5-sulfosalicílico y MoS_2 , para la detección de iones de Cobre, esto con el fin de obtener sensores electroquímicos capaces

de detectar Cu^{2+} , aprovechando la capacidad de los NTCPM de ser altamente conductores, para ello dispersaron NTCPM en HNO_3 por medio de ultrasonido, después de esto sometieron los NTCPM a un tratamiento térmico a 140°C por 4 h. para finalmente centrifugar los NTCPM y posteriormente decantar, una vez decantados añadieron las nanopartículas de MoS_2 , así como, el ácido sulfosalicílico para poner en sonicación y posteriormente obtener las nanoestructuras modificadas.

Parsaee y col. (2018)¹², reportan la modificación de OG con nanopartículas de plata, para la detección de celecoxib, 4- [5- (4-metilfenil) -3- (trifluorometil) -1H-pirazol-1-ilo], el cual es un fármaco antiinflamatorio no esteroideo utilizado para el tratamiento de artritis y reumatismo, se cree que retrasa el desarrollo de Alzheimer, sin embargo, no es fácil degradarlo biológicamente, por lo que persiste en el medio ambiente pudiendo ser letal, por lo que aprovechando las propiedades del OG, desarrollaron un biosensor capaz de detectar este tipo de contaminantes, para dicha síntesis se apoyaron del método de Hummers modificado, el cual consiste en dispersar el OG en DMF y llevarlo a ultrasonido por 1 h, posteriormente se agrega SOCl_2 y se coloca en tratamiento térmico a 80°C por 30 min.

Diaz-Liñán y col. (2020)¹³, mencionaron que la modificación superficial o estructural de polímeros con nanopartículas puede inducir nuevas propiedades en el polímero dependiendo del tipo de nanopartículas, dichos cambios se podrán observar en las propiedades mecánicas y físicas del material resultante, en algunos casos teniendo una mayor dureza o flexibilidad.

Faraguna y col. (2017)¹⁴, reportaron la modificación de NTCPM con 1-bromo-3-fenilpropano, para su posterior incorporación a una matriz polimérica de poliestireno. Para esto llevaron a cabo un tratamiento agresivo en ácido nítrico a altas temperaturas, con el objetivo de estudiar los efectos de los NTCPM en el peso molecular del poliestireno, además de analizar las propiedades térmicas, eléctricas y mecánicas del material resultante.

Jin y col. (2020)¹⁵, llevaron a cabo la modificación de OG con bromuro de tetraoctilamonio, en condiciones básicas por un periodo de 3 h a 60°C , posteriormente lo incorporaron al estireno y llevaron a cabo la polimerización con la finalidad de lograr una buena dispersión de las nanoestructuras modificadas en la matriz polimérica utilizando disolventes orgánicos.

El ultrasonido de baja frecuencia (US), es una técnica ampliamente utilizada, la cual se define como un sonido de frecuencia que está por encima del límite audible por el ser humano, se basa en la formación de burbujas de cavitación, donde estas burbujas crecen hasta colapsar debido a la presión formada por su entorno, estas burbujas generan un calentamiento local y una alta presión, las cuales son condiciones ideales para la dispersión de algunas nanopartículas o nanoestructuras dentro de diferentes matrices, generalmente la sonoquímica trabaja en rangos de alrededor de 20 a 40 kHz, sin embargo, se han registrado investigaciones con rangos más amplios¹⁶⁻¹⁷. Cabello

y col. (2015) mencionan que el US es considerado un excelente método para la dispersión de NTCPM, además de ser utilizado como una energía de activación en la modificación superficial de NTCPM¹⁸.

En el presente trabajo se reporta la obtención de un nanocompuesto a base de poliestireno reciclado y la adición de nanoestructuras de carbono como NTCPM y OG, las cuales fueron modificadas previamente con ácido benzoico, asistiéndose el proceso con ultrasonido de baja frecuencia, con la finalidad de mejorar las propiedades térmicas de los NCs y encontrar el disolvente óptimo para el procesado del nanocompuesto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modificación de OG y NTCPM

Se preparó una solución sobresaturada de ácido benzoico, para ello se disolvieron 16 g de ácido benzoico grado analítico de marca Jalmek y se disolvieron en 100 mL de etanol, la disolución se colocó sobre una parrilla de agitación magnética por 5 minutos. Se pesaron 0.5 g de OG, así como también de NTCPM y se colocaron en matraces de fondo redondo, se añadieron 20 mL de la solución saturada de ácido benzoico y se llevó US de baja frecuencia a 60 Hz por 120 minutos.

Terminado el periodo de sonicación el OG y los NTCPM se trasvasaron a tubos para centrifuga de 50 mL, se lavó el restante del material en el matraz con etanol, y se ajustó el volumen en los tubos a 25 mL. Los tubos se centrifugaron por un periodo de 10 minutos a 6000 rpm para posteriormente decantar el sobrenadante y colocar el GO y los NTCPM en un horno de secado a 60°C por un periodo de 72 h.

Pruebas de dispersión de OG y NTCPM modificados

Se colocaron 0.01 g de OG y NTCPM en viales de vidrio de 20 mL y se le añadieron 10 mL de disolvente, se sonicaron por 10 minutos usando US de baja frecuencia a 60 Hz y posteriormente se observó la dispersión en cada uno de los disolventes. Se monitoreó la dispersión cada 24 horas por 5 días.

Los disolventes usados para llevar a cabo las pruebas de dispersión fueron: agua destilada, etanol, acetona, acetato de etilo, hexano, y cloruro de metileno, todos ellos grado analítico de marca comercial Jalmek, estos disolventes fueron seleccionados en base a su diferencia de polaridad.

Preparación del nanocompuesto

Los NCs de PS puro, PS-NTCPM y PS-OG se prepararon mediante la técnica de mezcla en solución primero se pesaron 3 g de poliestireno obtenido de platos desechables comerciales, se colocaron en vasos de precipitado y se añadieron 10 mL de disolvente, posteriormente se llevó a ultrasonido de baja frecuencia, en un baño de US de la marca BRANSON, modelo

5800, por 5 minutos a 60 Hz y finalmente los NCs se vertieron en moldes y se llevaron a secar en un horno de secado, para los NCs con nanoestructuras modificadas, se pesaron 3 g de poliestireno y se añadieron 0.01 g de OG modificados y 10 mL del disolvente, posteriormente se colocó en baño de ultrasonido de baja frecuencia por 5 minutos a 60 Hz. Una vez transcurrida la sonicación se vertió la solución en un molde de vidrio y se dejó secar a temperatura ambiente para la evaporación del disolvente. El mismo procedimiento se llevó a cabo para los NTCPM modificados, tomando en cuenta que se utilizaron dos disolventes para el procesamiento de los NCs los cuales fueron acetato de etilo y acetona. La concentración de las nanoestructuras modificadas se varió para tener NCs de una concentración baja del 0.33% y una concentración alta del 5 % respecto a la masa de poliestireno, para así saber si es determinante la concentración de las nanoestructuras dentro de la matriz polimérica.

Espectroscopia infrarroja

La espectroscopia infrarroja fue utilizada para obtener información sobre la estructura química. Para llevar a cabo la caracterización por FTIR se empleó un espectrofotómetro marca Perkin-Elmer, mediante Attenuated Total Reflectance (ATR, por sus siglas en inglés), las muestras fueron analizadas sin ningún tipo de tratamiento previo, trabajando en un intervalo de 4500 a 580 cm^{-1} , con 2 cm^{-1} de resolución, con 32 adquisiciones.

Análisis termogravimétrico

La técnica de análisis termogravimétrico (TGA) mide la cantidad y la rapidez del cambio de peso de una muestra problema en función de la temperatura o del tiempo en una atmosfera controlada el análisis se llevó a cabo en condiciones de 30 a 800 $^{\circ}\text{C}$ con una velocidad de calentamiento de 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ en una atmosfera de nitrógeno con un equipo marca Discovery modelo Series 2500.

Microscopia óptica

La microscopia óptica se realizó a través de un microscopio de fluorescencia, el cual permite observar la dispersión de las nanoestructuras en la matriz polimérica, para ello se usó un microscopio de fluorescencia marca Carl Zeiss modelo AX1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pruebas de dispersión a temperatura ambiente

En la Figura 1, se muestran las pruebas de dispersión realizadas en distintos disolventes, las pruebas de dispersión permitieron observar la modificación del OG, así como de los NTCPM, se observa cómo se mantiene una dispersión homogénea, de izquierda a derecha, agua destilada, etanol, acetona, acetato de

etilo, hexano, cloruro de metileno. En el inciso a) se presentan los resultados para los NTCPM, mientras que en el inciso b) están los resultados para el OG después de 24 h. Se observa que los NTCPM mantienen una mayor dispersión en etanol y hexano, mientras que el OG mantiene una buena dispersión en acetona, etanol, acetato de etilo y cloruro de metileno, lo cual indica una mejor dispersión de las nanoestructuras en disolventes polares. Algunos autores mencionan que este comportamiento es atribuible a las interacciones que hay entre las estructuras de carbono modificadas y el disolvente, ya que en este caso los NTCPM, así como el OG fueron modificados con ácidos orgánicos, lo cual puede promover la formación de puentes de hidrogeno entre el grupo carbonilo del ácido y los disolventes polares, mientras que la dispersión en disolventes no polares se ve favorecida gracias a las interacciones de tipo Van der Waals^{19,20,21}.



Figura 1. Pruebas de dispersión a temperatura ambiente a) para los NTCPM modificados, b) para el OG modificado en disolventes de acetona, etanol, acetato de etilo, y cloruro de metileno respectivamente.

Caracterización mediante espectroscopia FTIR

Las caracterizaciones mediante FTIR permiten conocer si se presentó algún cambio en la estructura química de la matriz polimérica, es por lo que fue fundamental realizar esta caracterización a la matriz polimérica antes de ser sometida a la disolución. En la Figura 2, se muestra el espectro FTIR correspondiente al poliestireno puro y poliestireno puro después del procesado en disolventes de acetato de etilo y acetona, donde se observa la presencia de bandas en el rango de 3081 a 3004 cm^{-1} las cuales son bandas características para una tensión aromática =C-H, las bandas 2921 a 2851 cm^{-1} corresponden a los estiramientos C-H, se observó una banda de absorción del anillo aromático monosustituido a 1943 y 1746 cm^{-1} , a 1449 cm^{-1} se encontró la deformación C=C del anillo aromático y a 1069 y 780 cm^{-1} se observa la flexión C-H en el plano, las cuales son señales características para poliestireno²²⁻²³.

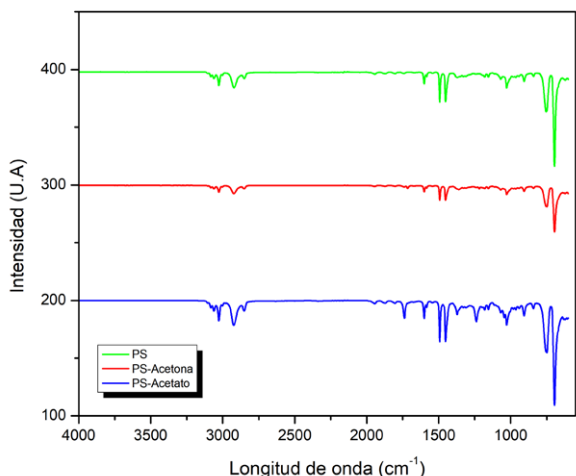


Figura 2. Espectros FTIR de los compuestos de poliestireno puro y poliestireno procesado con acetona y acetato de etilo.

En la Figura 3, se presenta los resultados del análisis FTIR para los NCs a base de poliestireno con NTCPM modificados con ácido benzoico en concentraciones de 0.33 y 5%, procesados en diferentes disolventes como acetato de etilo y acetona, donde se aprecian las señales características para el poliestireno además se presenta una banda dentro del rango de 1700 a 1750 cm^{-1} las cuales corresponden al estiramiento C=O del grupo carbonilo, así como una pequeña banda en el rango de 3200 cm^{-1} , la cual corresponde al estiramiento O-H del ácido benzoico, sin embargo estas bandas se encuentran muy disminuida debido a la concentración de las nanoestructuras dentro de la matriz polimérica, la pequeña banda que aparece cerca de 3070 cm^{-1} corresponde a las interacciones =C-H de las nanoestructuras, esto se ve confirmado con las bandas observadas en el rango de 1620 a 1680 cm^{-1} correspondientes también a los estiramientos C=C también de las nanoestructuras, algo similar a lo reportado por Patole y col. (2012)²⁴, reportaron la polimerización *in situ* de poliestireno para la obtención de NCs híbridos de poliestireno con NTCPM y grafeno.

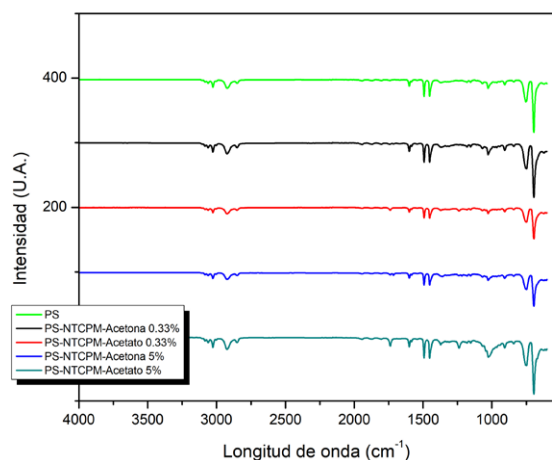


Figura 3. Espectro para los nanocompuestos de poliestireno con NTCPM en concentraciones de 0.33 y 5% procesados con acetona y acetato de etilo.

En la Figura 4, se presenta los resultados del análisis FTIR para los NCs a base de poliestireno con OG modificados con ácido benzoico en concentraciones de 0.33 y 5%, procesados en diferentes disolventes como acetato de etilo y acetona, donde se aprecian las señales características para el poliestireno a 3081 a 3004 cm^{-1} las cuales son bandas características para una tensión aromática =C-H, las bandas 2921 a 2851 cm^{-1} corresponden a los estiramientos C-H, se observó una banda de absorción del anillo aromático monosustituido a 1943 y 1746 cm^{-1} . Es importante destacar que las bandas características para el poliestireno no presentan ninguna alteración, es decir se puede comparar el poliestireno puro contra el poliestireno con nanoestructuras de carbono a diferentes concentraciones, encontrando que los NCs presentan una tendencia similar en cuanto a las bandas originales del poliestireno, lo que lleva a deducir que químicamente el poliestireno no presenta una modificación y la concentración de las nanoestructuras no incide directamente en la estructura química del poliestireno.

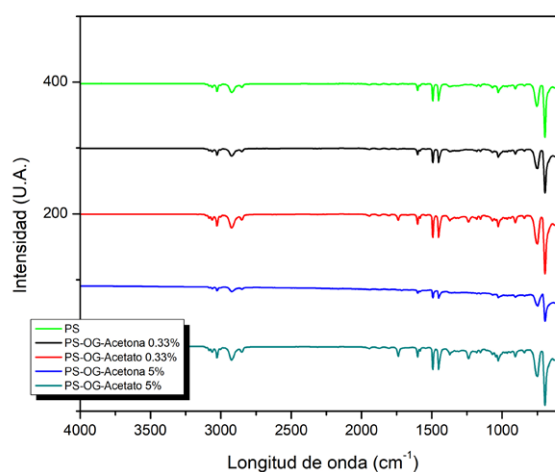


Figura 4. Espectro para los nanocompuestos de poliestireno con OG en concentraciones de 0.33 y 5% procesados con acetona y acetato de etilo.

Análisis termogravimétrico

En la Figura 5, se presentan los termogramas para los compuestos de poliestireno puro y poliestireno después del procesado con acetato de etilo y acetona, donde se observan una pérdida en peso a partir de 380 $^{\circ}\text{C}$, la cual se atribuye a la degradación del polímero, mientras que para los compuestos después del procesados empiezan a descomponerse a una temperatura más baja que el poliestireno puro lo cual se puede atribuir al disolvente residual que puedo contener los compuestos, sin embargo la temperatura de degradación del polímero sigue siendo la misma, similar a lo reportado por Patole y col. (2012)²⁴, quienes reportan la temperatura de descomposición de compuestos a base de poliestireno a partir de 380 $^{\circ}\text{C}$.

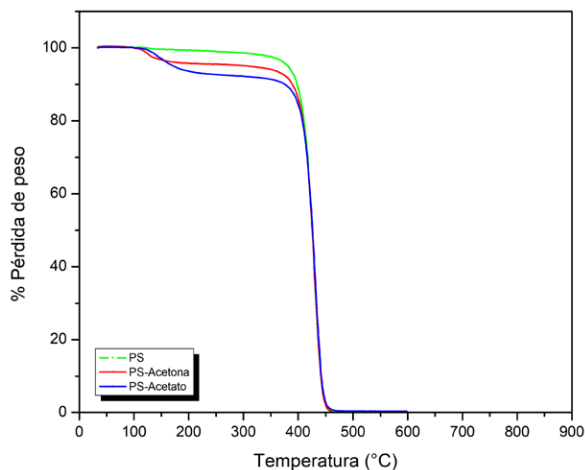


Figura 5. Termogramas de los nanocompuestos de poliestireno puro y poliestireno procesado con acetona y acetato de etilo.

Por otra parte en la Figura 6, se puede observar los resultados para los termogramas de los NCs a base de poliestireno con NTCPM modificados y procesados con diferentes disolventes en donde se puede apreciar que los NCs de PS-NTCPM 5%, presentan una mayor estabilidad térmica debido a que la temperatura correspondiente a una pérdida de masa del 50% es de 428 °C, para el procesado con acetona, mientras que para el nanocompuesto procesado con acetato de etilo tiene una temperatura de 430 °C a diferencia del poliestireno puro el cual tiene una temperatura de 420 °C a una pérdida de masa del 50%, es notable la mejora en la estabilidad térmica en los compuestos de PS-NTCPM 5% lo cual está de acuerdo a los informes de la literatura por Chrissafis y col. (2014)²⁵, quienes reportan la obtención de un nanocompuesto de poliestireno con NTCPM al 3% observando una mejora en la estabilidad térmica del nanocompuesto.

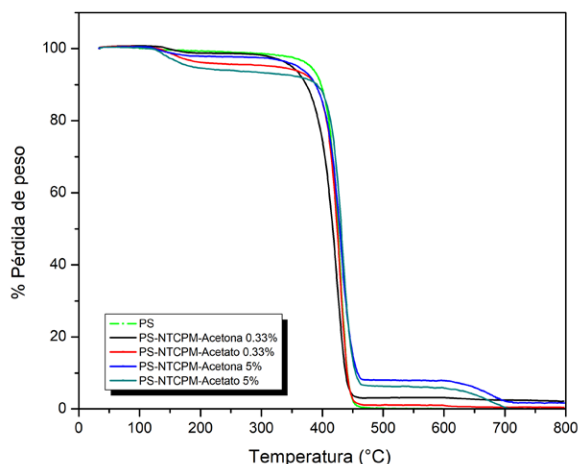


Figura 6. Termogramas de los nanocompuestos de poliestireno con NTCPM en concentraciones de 0.33 y 5% procesados con acetona y acetato de etilo.

Las curvas termogravimétricas de los NCs de poliestireno y poliestireno con OG con diferentes disolventes en el procesado se muestran en la Figura 7, los NCs de PS-OG 5% presentan una mayor estabilidad térmica a diferencia

de los NCs que contienen concentraciones de OG al 0.33% y los compuestos de poliestireno puro debido a que la temperatura correspondiente a una pérdida en peso del 40% es de 448 °C, para el PS-OG 5% en acetona, así mismo la temperatura para el compuesto de PS-OG 5% en acetato de etilo es de 441 °C, mientras que para el poliestireno puro es de 421 °C. Por lo que se puede deducir que se tiene una mayor estabilidad térmica después de la incorporación de las nanoestructuras de carbono en concentraciones del 5% en ambos disolventes, sin embargo, se presentó una mayor estabilidad térmica en los NCs que contienen OG. Así mismo se relaciona con lo reportado por Patole y col. (2012)²⁴, quienes atribuyen la mejora en la estabilidad térmica a las nanoestructuras de carbono que actúan como un efecto de barrera que impide el transporte de productos de degradación del polímero a la fase gaseosa.

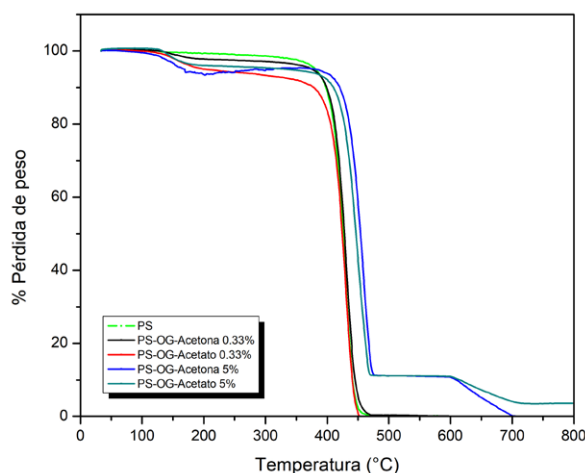
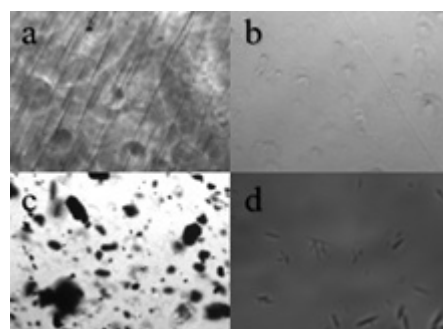


Figura 7. Termogramas de los nanocompuestos de poliestireno con OG en concentraciones de 0.33 y 5% procesados con acetona y acetato de etilo.

Caracterización mediante microscopía óptica

En la Figura 8, se muestra las fotografías obtenidas mediante microscopía óptica, donde se observa la dispersión de las nanoestructuras modificadas en la matriz polimérica, comparándose con los compuestos a base de poliestireno puro a 10x y 100x respectivamente. Se observa que las nanoestructuras se encuentran dispersas de manera homogénea dentro de la matriz polimérica debido a la gran compatibilidad del poliestireno con las nanoestructuras modificadas superficialmente con el ácido orgánico.



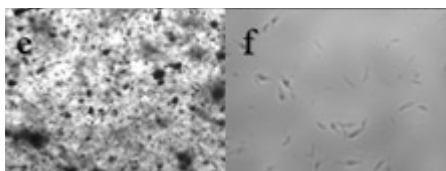


Figura 8. Micrografías ópticas de los nanocompuestos de a) poliestireno a 10x, b) poliestireno a 100x, c) nanocompuesto de poliestireno con NTCPM 10x, d) nanocompuesto de poliestireno NTCPM a 100x, e) nanocompuesto de poliestireno con OG a 10x, f) nanocompuesto de poliestireno con OG a 100x.

CONCLUSIÓN

Se concluye que se llegó a la obtención de NCs a base de poliestireno reciclado con nanoestructuras de carbono con diferentes disolventes a la hora del procesado como acetato de etilo y acetona, obteniendo la concentración óptima para ambas nanoestructuras de carbono la cual fue del 5% y el disolvente óptimo para el procesado el cual no mostro una diferencia significativa entre los dos disolventes: acetato de etilo y acetona, además, se comprobó que las nanoestructuras de carbono: OG y NTCPM no afectan la estructura química del poliestireno, por otro lado, se observó que se tiene una mayor dispersión de las nanoestructuras sobre la matriz polimérica gracias a la modificación superficial de ambas nanoestructuras con el ácido orgánico y con base a los resultados obtenidos mediante TGA se puede concluir que se llegó a la formación de un nanocompuesto con una mayor estabilidad térmica esto gracias a la integración de las nanoestructuras de carbono logrando aumentar hasta 27 °C la temperatura de descomposición de la matriz polimérica. Así mismo los NCs se presentan como una alternativa para reciclar este tipo de contaminantes y la obtención de un material compuesto a partir de deshechos con un valor agregado.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Autónoma de Coahuila, a la Facultad de Ciencias Químicas, así como al apoyo proporcionado por el CONACyT a través del proyecto SEP-CONACyT Ciencias Básica 2017-2018 CB2017-2018 A1-S-44977.

REFERENCIAS

1. Organización de las Naciones Unidas. Objetivos De Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/> (accessed Feb 10, 2021)
2. Carta de la Tierra. La Carta de la Tierra. <https://cartadelatierra.org/lea-la-carta-de-la-tierra/integridad-ecologica/> (accessed Feb 10, 2021)
3. Kik, K.; Bukowska, B.; Sicińska, P. Polystyrene Nanoparticles: Sources, Occurrence in the Environment, Distribution in Tissues, Accumulation and

Toxicity to Various Organisms. *Environmental Pollution* **2020**, *262*, 114297.

4. Zhao, Y.; Bao, Z.; Wan, Z.; Fu, Z.; Jin, Y. Polystyrene Microplastic Exposure Disturbs Hepatic Glycolipid Metabolism at the Physiological, Biochemical, and Transcriptomic Levels in Adult Zebrafish. *Science of The Total Environment* **2020**, *710*, 136279.
5. De Felice, B.; Sabatini, V.; Antenucci, S.; Gattoni, G.; Santo, N.; Bacchetta, R.; Ortenzi, M.; Parolini, M. Polystyrene Microplastics Ingestion Induced Behavioral Effects to the Cladoceran *Daphnia Magna*. *Chemosphere* **2019**, *231*, 423-431.
6. Vidrano, B.; Haselein, C.; Pedrazzi, C.; Santini, E. Reciclagem de Poliestireno para Fabricação de Painéis WPC. *Sustentabilidade de Recursos Florestais 2* **2019**, 165-174.
7. Lugo, F.; Sáenz-Galindo, A.; Castañeda-Facio, A.; Ávalos, F. *CienciAcierta* No. 61, enero-marzo 2020. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2020/01/11/cienciacierta-no-61-enero-marzo-2020/> (accessed Jun 2020).
8. Gómez, J. La Producción Mundial de Plásticos Creció un 3,8% en 2017 - MundoPlast. <https://mundoplast.com/produccion-mundial-plasticos-2017/> (accessed Mar 2020).
9. Usuki, A.; Kojima, Y.; Kawasumi, M.; Okada, A.; Fukushima, Y.; Kurauchi, T.; Kamigaito, O. Synthesis Of Nylon 6-Clay Hybrid. *Journal of Materials Research* **1993**, *8* (5), 1179-1184.
10. Kapitanova, O.; Emelin, E.; Dorofeev, S.; Evdokimov, P.; Panin, G.; Lee, Y.; Lee, S. Direct Patterning of Reduced Graphene Oxide/Graphene Oxide Memristive Heterostructures by Electron-Beam Irradiation. *Journal of Materials Science & Technology* **2020**, *38*, 237-243.
11. Wang, S.; Li, J.; Qiu, Y.; Zhuang, X.; Wu, X.; Jiang, J. Facile Synthesis of Oxidized Multi-Walled Carbon Nanotubes Functionalized with 5-Sulfosalicylic Acid/MoS₂ Nanosheets Nanocomposites for Electrochemical Detection of Copper Ions. *Applied Surface Science* **2019**, *487*, 766-772.
12. Parsaee, Z.; Karachi, N.; Abrishamifar, S.; Kahkha, M.; Razavi, R. Silver-Choline Chloride Modified Graphene Oxide: Novel Nano-Bioelectrochemical Sensor for Celecoxib Detection and CCD-RSM Model. *Ultrasonics Sonochemistry* **2018**, *45*, 106-115.
13. Díaz-Liñán, M.; López-Lorente, A.; Cárdenas, S.; Lucena, R. Molecularly Imprinted Paper-Based Analytical Device Obtained by a Polymerization-Free Synthesis. *Sensors and Actuators B: Chemical* **2019**, *287*, 138-146.
14. Faraguna, F.; Pötschke, P.; Pionteck, J. Preparation of Polystyrene Nanocomposites with Functionalized Carbon Nanotubes by Melt and Solution Mixing: Investigation of Dispersion, Melt Rheology, Electrical and Thermal Properties. *Polymer* **2017**, *132*, 325-341.
15. Jin, M.; He, W.; Wang, C.; Yu, F.; Yang, W. Covalent Modification of Graphene Oxide and Applications in Polystyrene Composites. *Reactive and Functional Polymers* **2020**, *146*, 104437.

16. Barceló, M.; Morey, J. Los Ultrasonidos: Sus Riesgos Y Normas De Prevención. *Mapfre seguridad* **2003**, 90 (2), 11-17.
17. Hommer, H. La Aplicación Del Ultrasonido En Química. *Educación Química* **2018**, 9 (2), 91.
18. Cabello, C.; Sáenz-Galindo, A.; Pérez, C.; López, L.; Barajas, L.; Cantú-Sifuentes, L.; Ávila, C. Modificación de Nanotubos de Carbono de Pared Múltiple (MWNTC's) Usando Ácido Acético y Anilina Mediante Radiación Ultrasónica. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* **2015**, 35(1), 27-33.
19. Cabello, C.; Rincón, S.; Bartolo, P.; Ruiz-Espinoza, J.; Zepeda, A. Incorporation of Organic Groups on the Surface of Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures* **2018**, 26, 502-509.
20. Cabello, C.; Bartolo, P.; Rincón, S.; Cabañas, D.; Zepeda, A. Modification of Multi-Walled Carbon Nanotubes with 1,4-Diaminobutane Dihydrochloride Through Heating at Reflux. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures* **2017**, 25(6), 348-354.
21. Cabello-Alvarado, C.; Andrade-Guel, M.; Pérez-Alvarez, M.; Cadenas-Pliego, G.; Cortés-Hernández, D. A.; Bartolo-Pérez, P.; Ávila-Orta, C. A.; Cruz-Delgado, V. J.; Zepeda-Pedreguera, A. Graphene Nanoplatelets Modified with Amino-Groups by Ultrasonic Radiation of Variable Frequency for Potential Adsorption of Uremic Toxins. *Nanomaterials*, **2019**, 9(9), 1261.
22. Jiménez, J. Ciencias de los Materiales VI: Determinando la composición de un plástico desconocido Steemit. <https://steemit.com/spanish/@bape682/ciencias-de-los-materiales-vi-determinando-la-composicion-de-un-plastico-desconocido> (accessed May 27, 2020).
23. Rojo-Callejas, F. Tablas de Espectroscopía Infrarroja. http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/TablasIR_34338.pdf (accessed May 27, 2020).
24. Patole, A.; Patole, S.; Jung, S.; Yoo, J.; An, J.; Kim, T. Self Assembled Graphene/Carbon Nanotube/Polystyrene Hybrid Nanocomposite by *In Situ* Microemulsion Polymerization. *European Polymer Journal* **2012**, 48 (2), 252-259.
25. Chrissafis, K.; Pavlidou, E.; Vouvoudi, E.; Bikiaris, D. Decomposition Kinetic and Mechanism of Syndiotactic Polystyrene Nanocomposites with MWCNT's and Nanodiamonds Studied by TGA And Py-GC/MS. *Thermochimica Acta* 2014, 583, 15-24. *Biomass and Bioenergy*. 2020;138:105546. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105546>.
26. Lee JTE, Wang Q, Lim EY, Liu Z, He J, Tong YW. Optimization of bioaugmentation of the anaerobic digestion of *Axonopus compressus* cowgrass for the production of biomethane. *Journal of Cleaner Production*. 2020;258:120932. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120932>.