

Nanocompuestos flexibles libres de plomo para la atenuación de rayos X de radiodiagnóstico

Flexible Lead-Free Nanocomposites for Radiodiagnostic X-ray Attenuation

Adriana G. Nuñez-Briones^{1,2}, Roberto Benavides-Cantu¹, Luis A. García-Cerda¹, Felix R. Saucedo-Zendejo³

¹ Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Blvd. Enrique Reyna Hermosillo 140, 25294 Saltillo, Coahuila, México.

² Facultad de Sistemas, Universidad Autónoma de Coahuila, Carretera a México Km 13, 25350, Arteaga, Saltillo, Coahuila, México.

³ Centro de Investigación en Matemáticas Aplicadas, Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Camporredondo Edificio "S", C.P. 25115, Saltillo, Coahuila, México.

Autor de correspondencia: Adriana Guadalupe Nuñez Briones
Correo electrónico: adriananunez@uadec.edu.mx
ORCID ID: 000-0002-1300-3345

Resumen

Actualmente las radiaciones ionizantes son empleadas en gran medida dentro del sector salud para la obtención de una radiografía, o en terapias contra el cáncer, por lo que las energías empleadas van desde bajas hasta altas. Por lo tanto, es necesario proteger de exposiciones innecesarias a la radiación ionizante, tanto a pacientes como a trabajadores. Con este fin se emplean materiales de blindaje que en su mayoría están elaborados con plomo. Sin embargo, la exposición constante a este metal puede traer problemas adicionales de salud, debido a su toxicidad y su alta densidad, por lo que desde hace años se están realizando esfuerzos por encontrar un diseño de nuevos materiales libres de plomo para la atenuación de radiación ionizante, los cuales sean ligeros, flexibles y no tóxicos. El presente trabajo tiene como objetivo mostrar una parte de la investigación que se ha realizado con el propósito de acercarse al diseño adecuado de nuevos materiales capaces de atenuar fotones de rayos X libres de plomo, considerando el uso de nanocompuestos poliméricos, cargados con estructuras metálicas o sus compuestos.

Palabras clave: Atenuación de rayos X, nanopartículas, nanocompuestos poliméricos.

Abstract

Currently, ionizing radiation is largely used within the health sector, to obtain an-x-ray or in cancer therapies, so the energies used range from low to high. Therefore, it is necessary to protect both patients and workers from unnecessary exposure to ionizing radiation. For this purpose, shielding materials are used which are mostly made of lead. However, constant exposure to this metal can bring additional health problems, due to its toxicity and high density. Therefore, efforts have been made for years to find a design of new lead-free materials for ionizing radiation attenuation, which are light, flexible and non-toxic. The present work aims to show a part of the

research that has been carried out with the purpose of approaching the adequate design of new materials capable of attenuating lead-free X-ray photons, considering the use of polymeric nanocomposites, loaded with metallic structures or its compounds.

Keywords: X-ray attenuation, nanoparticles, polymeric nanocomposites.

Introducción

La radiación ionizante, principalmente la radiación gamma y X, es ampliamente utilizada en todo el mundo para diversas aplicaciones en industrias, hospitales, laboratorios, etc. En el área médica, especialmente en las áreas de radiología, medicina nuclear y radioterapia, es de gran importancia para los tratamientos y diagnósticos médicos (Nuñez-Briones y col., 2022; Nuñez-Briones y col., 2023). Sin embargo, la radiación puede afectar negativamente la salud de las especies vivas y deteriorar el ADN de las células. Por tal motivo, si no se emplean las medidas adecuadas de protección radiológica al trabajar con radiaciones, tanto los trabajadores como pacientes pueden estar expuestos a radiación ionizante innecesaria que pueden traer problemas adicionales de salud. (Domínguez, 2014; Puerta-Ortiz y Morales-Aramburo, 2020; OMS, 2023).

La protección radiológica garantiza una protección adecuada a los trabajadores y pacientes de cualquier exposición innecesaria a radiación ionizante. Su objetivo principal es reducir hasta donde sea razonablemente posible los riesgos que implica el uso de materiales radiactivos o dispositivos generadores de radiación ionizante. Uno de los factores para cumplir con este propósito es el blindaje, el cual se basa en el uso de materiales fabricados principalmente de plomo (Domínguez, 2014). El plomo cuenta con las mejores características como atenuador de radiación ionizante, sin embargo, tiene las desventajas de ser pesado y tóxico. Por lo tanto, una exposición prolongada a este material podría producir problemas adicionales

de salud, como intoxicaciones y deformaciones óseas debido al peso de este. A su vez, podría haber efectos perjudiciales para el medio ambiente al momento de desecharlo. Por tales motivos, desde hace años se considera que este material no es el más adecuado para la fabricación de aditamentos de blindaje contra la radiación y se están realizando esfuerzos para la búsqueda de nuevos materiales y diseños para la fabricación de blindajes de radiación libres de plomo (Liu y col., 2014; Low y Azman, 2020).

Los materiales alternativos para ser utilizados como blindaje de radiación ionizante, deben ser escudos que sean lo suficientemente eficaces en absorber la mayor parte de la radiación electromagnética antes de que llegue al cuerpo humano, y a su vez, deben ser flexibles, maleables y no tóxicos, para conseguir dispositivos más cómodos que los utilizados tradicionalmente, tomando en cuenta alcanzar el objetivo del principio ALARA (Dosis tan baja como sea razonablemente posible) (Nambiar y col., 2013; Intom y col., 2020; Low y Azman, 2020).

En el grupo de trabajo se ha llevado a cabo la investigación del desarrollo de compuestos de matriz polimérica (PVC plastificado entrecruzado) cargados con diferentes nanoestructuras de compuestos de bismuto, tungsteno, plata, tantalio, etc. Los compuestos elaborados han mostrado ser una excelente alternativa para ser posibles sustitutos de los materiales tradicionalmente utilizados como atenuadores de radiación X en el rango de energías de radiodiagnóstico. El uso de PVC como matriz, con una carga de nanopartículas inorgánicas, en proporciones menores a las cargas de plomo utilizadas, proporciona el diseño de un material flexible y tenaz, menos denso y pesado que los materiales tradicionalmente utilizados con base en plomo metálico o de sus compuestos.

- **La radiación y su uso en el área médica.**

La radiación es la propagación de energía a través de ondas electromagnéticas o a través de partículas. Se clasifica como radiación ionizante y radiación no ionizante. La radiación ionizante es aquella capaz de producir ionización en la materia con la que interactúa.

La propagación de energía a través de ondas electromagnéticas es mejor conocida como radiación electromagnética. Se propaga en forma de fotones de diferentes energías que viajan a la velocidad de la luz, involucrando distintas longitudes de onda. Se puede producir tanto de forma natural como de forma artificial haciendo uso de aparatos creados por el ser humano. Dentro de este grupo se incluye a los rayos X y rayos gamma, que por su energía constituyen un tipo de radiación ionizante. La diferencia entre ellos está en la energía de sus fotones y en el origen de estos. (Domínguez, 2014; OMS, 2023).

Las radiaciones ionizantes tienen una gran variedad de aplicaciones en la industria, la investigación, la medicina, etc. En el ámbito de la medicina sus aplicaciones van desde la obtención de una radiografía, hasta su uso en terapias contra el cáncer (Gallegos Díaz, 2010).

- En diagnóstico médico se utiliza una fuente artificial de radiación electromagnética (tubo de rayos X) para la obtención de imágenes planas o tridimensionales de diferentes estructuras del cuerpo humano.
- En medicina nuclear se obtienen imágenes al medir la radiación gamma que emiten los pacientes tras administrarles algún fármaco con radionucleidos.
- En radiología intervencionista se hace uso en tiempo real de la radiación X, a través de la obtención de imágenes de fluoroscopia o tomografía computarizada.

- En radioterapia se utilizan radiaciones ionizantes de alta energía para diferentes tratamientos contra el cáncer, principalmente.

Como se puede apreciar las radiaciones son utilizadas ampliamente en el sector salud. Sin embargo, las dosis de radiación utilizadas pueden ser pequeñas o muy altas. Por lo tanto, se debe proteger tanto a el personal como a los pacientes y al público en general de exposiciones innecesarias a la radiación ionizante. Para ello la protección radiológica se basa en tres factores básicos de protección; la distancia, el tiempo y el blindaje. Siendo de interés principal para la investigación abordada en el presente trabajo el factor blindaje (Poveda y Plazas, 2020).

Para un adecuado blindaje en el área médica se emplean materiales elaborados en su mayoría con plomo, prendas, lentes plomados, mamparas plomadas, vidrios plomados, paredes de gran espesor con diferentes capas de materiales, etc. (Poveda y Plazas, 2020).

Las prendas de protección a la radiación incluyen, protectores de gónadas, mandiles, collarines, guantes, lentes, etc. En la Figura 1, se pueden observar algunas de estas prendas.

De forma general, estas prendas están elaboradas en su mayoría con plomo, y tienen pesos que van desde los 300 gramos hasta los 8.5 kilogramos, siendo la prenda de menor peso un protector gonadal y la de mayor peso un mandil completo (Petrone, 2021). El plomo además de ser pesado es tóxico. Por lo tanto, un uso prolongado de estas prendas puede traer problemas adicionales de salud, como deformaciones óseas, así como al medio ambiente al momento de desecharlo (Liu y col., 2013; Low y Azman, 2020, Abbas y col., 2022).



Figura 1. Aditamentos protectores de radiación (Sociedad Argentina de Pediatría, 2018).

En el mercado hay prendas protectoras en su versión libre de plomo, sin embargo, son prendas que tienen un peso similar a las prendas elaboradas con plomo. En la Figura 2, se muestra un delantal plomado el cual tiene un peso aproximado de 4.7 kg. Un mandil similar libre de plomo tiene un peso de 4.5 kg (Petrone, 2021). No hay gran diferencia en el peso de ambos. Por lo tanto, es necesario buscar el diseño adecuado de nuevos materiales libres de plomo ligeros, flexibles y maleables, capaces de atenuar la radiación X y gamma principalmente, con el objetivo de elaborar prendas de protección cómodas que no ocasionen problemas adicionales de salud con el uso a largo plazo.



Figura 2. Mandil plomado (Petrone, 2021).

- **Interacción de la radiación con la materia**

La radiación ionizante experimenta diferentes tipos de interacción durante su trayecto a través de la materia, dependiendo de su naturaleza. En la Figura 3, se muestran los diferentes tipos de interacción al incidir un haz de rayos X en un material de determinado espesor; absorción total de la energía, dispersión de radiación en todas las direcciones y atenuación de la intensidad de la radiación incidente. Debido a estas interacciones, un haz de radiación durante su trayecto a través de algún material pierde parte de su energía, por lo que, la intensidad de este se ve disminuida.

La probabilidad de que ocurran cada una de las interacciones depende de la energía de la radiación, del espesor, de la densidad y del número atómico del material con el que interactúan. El destino de los fotones después de la interacción con un átomo de material se refiere a dos resultados posibles: (1) el fotón desaparece y una parte de su energía se transfiere a partículas cargadas ligeras (efecto fotoeléctrico y efecto Compton) o (2) el fotón se dispersa.

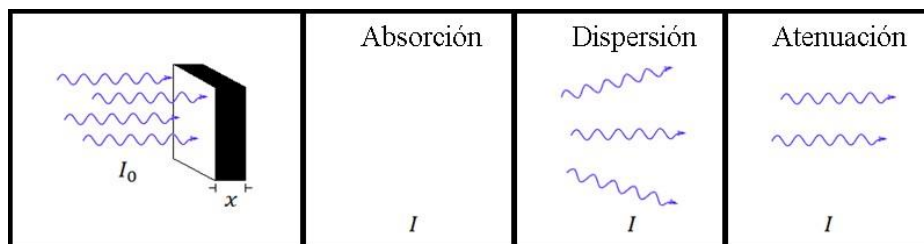


Figura 3. Interacción de la radiación con la materia (elaboración propia).

- **Materiales atenuadores de radiación X libres de plomo**

Los materiales que tienen la propiedad de atenuación de radiación son aquellos que son capaces de atenuar la radiación lo más razonablemente posible. Cuando se emprendieron los primeros estudios de protección hacia la radiación se comenzó con el uso de plomo como principal atenuador de radiación gamma y X, siendo empleado en paredes, pinturas, aditamentos protectores, etc., debido a que es un material denso, maleable y tiene un alto número atómico (Z). Sin embargo, como se mencionó en párrafos anteriores, así como tiene ventajas sobre otros materiales, tiene desventajas, ya que es tóxico y pesado, lo cual con un uso prolongado en aditamentos personales de protección (guantes, collarines, mandiles, etc.), puede traer problemas adicionales de salud. (Gallegos Díaz, 2010; Kaewpirom y col., 2022; Nuñez-Briones y col., 2023).

Los nanocompuestos con matriz polimérica cargados con nanoestructuras metálicas y o sus compuestos, son materiales multifuncionales. Es decir, materiales que integran dos o más propiedades de las cuales una es estructural y otra funcional. Por lo tanto, para la investigación hacia el diseño de nuevos materiales atenuadores de radiación, libres de plomo, un nanocompuesto es una opción atractiva. La matriz polimérica adecuada puede proporcionar las propiedades de

flexibilidad y ligereza. Por otro lado, las nanoestructuras empleadas como relleno pueden actuar como centros de atenuación, considerando a su vez que, al utilizarlas en tamaños nanométricos, con una adecuada dispersión y distribución dentro de la matriz, las propiedades mecánicas del compuesto se ven mejoradas, y las propiedades atenuantes pueden incrementarse (Korbekandi y Iravani, 2012), además de que el nanocompuesto puede tener una densidad inferior a la que tendría el material constituido únicamente de metal.

En la literatura se encuentran diversas investigaciones que se han realizado con respecto al diseño de materiales compuestos poliméricos, sin o con algún compuesto de plomo en tamaños nanométricos y micrométricos, observando una mejora en la capacidad de atenuación de rayos X al hacer uso de nanopartículas, debido a que, al tener las partículas tamaño nanométrico, estas se pueden dispersar de una manera más uniforme dentro de una matriz polimérica, obteniendo menos aglomeraciones en comparación con partículas de tamaño micrométrico, las cuales afectan además la densidad y la composición del material compuesto, modificando su capacidad para atenuar la intensidad de los rayos X (Low y Azman, 2020; Zarei M y col., 2021; Abbas y col., 2022; El-Sharkawy y col., 2022). En otras investigaciones los polímeros que se han utilizado son, PDMS, EPDM, poliamida, resina epóxica, PLA, HDPE, ISO, Caucho natural, PVC, por mencionar algunos. Empleado diferentes porcentajes de BO, Bi_2O_3 , $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, Pb, PbO , W, WO_3 , $\text{GO-Pb}_3\text{O}_4$. Los materiales investigados muestran la propiedad de atenuar parte o toda la radiación electromagnética que atenuaría un material basado en plomo en el rango de energías de radiodiagnóstico. Sin embargo, para lograr la atenuación se necesita utilizar una alta concentración de relleno, dependiendo de la energía considerada. No obstante, la capacidad de atenuación se ve disminuida conforme las energías son más altas, por lo que los espesores de los materiales deben ser mayores. Sin embargo, emplear una gran cantidad de nanopartículas como relleno en el compuesto y a su vez obtener materiales de gran espesor, pudiera ser una

desventaja para el diseño de nuevos materiales atenuadores de radiación debido a que las propiedades mecánicas se pueden ver comprometidas (Nambiar y col., 2013; Ambika y col., 2017; Güngör y col., 2018; Pavlenko y col., 2019; Cherkashina y col., 2019; Low y Azamna 2020; Abdalsalam y col., 2020; Intom y col., 2020; Hashemi y col., 2021; El-Sharkawy y col., 2023; El-safi y col., 2023).

Otra propiedad deseable para los materiales diseñados es que no sean tóxicos. Sin embargo, en literatura se encuentran pocas investigaciones que aborden el estudio de la toxicidad de los materiales a utilizar como posibles sustitutos del plomo para la elaboración de prendas protectoras de radiación.

Dentro del grupo de trabajo se ha investigado el uso de materiales nanocompuestos de PVC con óxido de bismuto (Bi_2O_3), óxido de tantalio (Ta_2O_5) y carburo de tantalio (TaC) en energías de mamografía y radiodiagnóstico, donde se encontraron resultados favorables en la propiedad de atenuación de radiación X en energías de radiodiagnóstico, así como mejoras en las propiedades mecánicas. Además, se observó mediante ensayos de toxicidad que los materiales diseñados no son tóxicos para las células humanas.

- **Coefficiente de atenuación de algunos metales.**

Otra de las características que poseen los materiales atenuadores de radiación, es el coeficiente de atenuación lineal, es decir, la cantidad que caracteriza que tan fácilmente un material es atravesado por un haz de rayos X.

En la Figura 4, se muestran los coeficientes de atenuación lineal del plomo y algunos metales, para energías utilizadas en radiodiagnóstico (20-140 kV). La imagen se obtuvo haciendo uso de datos recabados del Instituto Nacional de Estándares y Tecnologías en USA (NIST) (Hubell y Seltzer, 2004).

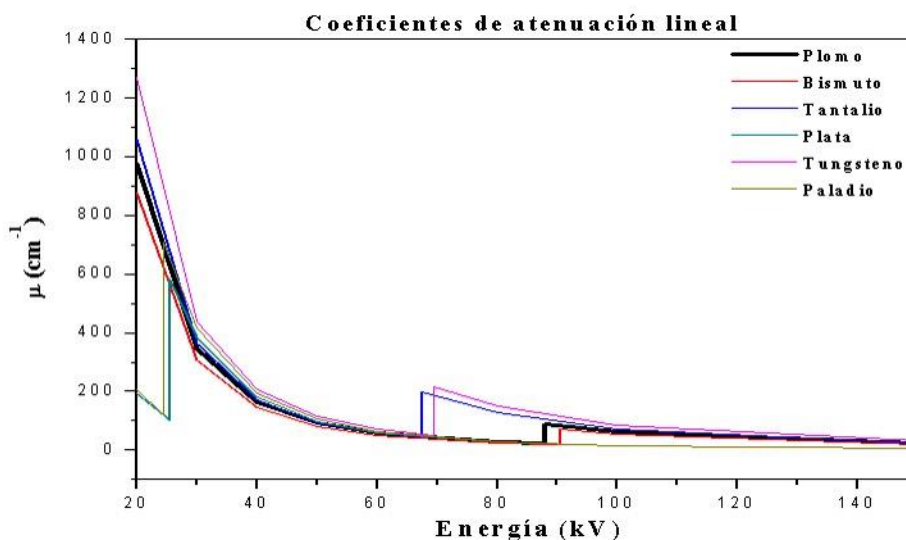


Figura 4. Coeficientes de atenuación lineal de algunos materiales (elaboración propia).

Se observa que, los materiales presentan un coeficiente de atenuación lineal similar al del plomo en casi todo el rango de energías, con excepción del paladio, el cual a partir de los 90 kV aproximadamente, presenta valores inferiores a los del plomo. No obstante, materiales como el tungsteno y el tantalio en energías de entre 65 y 90 kV exhiben coeficientes de atenuación incluso mayores a los que muestra el plomo.

Por lo tanto, de acuerdo con lo observado para estos metales, sus compuestos o combinaciones de estos podrían ser considerados como cargas en los nanocompuestos poliméricos, con la finalidad de que actúen como centros de atenuación. De esta forma los nanocompuestos se pueden considerar como alternativas potenciales para sustituir al plomo en materiales de blindaje.

- **Nanocompuestos de PVC, libres de plomo.**

Dentro del grupo de trabajo se elaboraron nanocompuestos circulares considerando diferentes espesores. Para la elección de la matriz se decidió emplear policloruro de vinilo (PVC) debido a que es un material versátil, económico, con afinidad a los plastificantes, con buenas propiedades mecánicas que pueden verse mejoradas mediante el entrecruzamiento. Por otro lado, el relleno corresponde a nanoestructuras de Bismuto y Tantalio y/o sus compuestos, se eligieron, con base al Coeficiente de atenuación lineal que presentan, en comparación con el del plomo. Estos rellenos, fueron añadidos en concentraciones de 0, 10, 30 y 50% en peso.

La evaluación de la propiedad de atenuación de rayos X, se realizó haciendo uso de un equipo de rayos X convencional aplicando energías comúnmente utilizadas para el diagnóstico médico. En la Figura 5, se puede apreciar el experimento realizado, este se realizó haciendo uso de un equipo de rayos X convencional Siemens Multics aplicando energías de 50-129 kV y una corriente de 20 mAs, las distancias foco - muestra y foco – detector se eligieron en base a la metodología aplicada por Nuñez-Briones y col., (2023), con la finalidad de que al detector no lleguen fotones secundarios debidos a la interacción del haz de rayos X con las muestras.

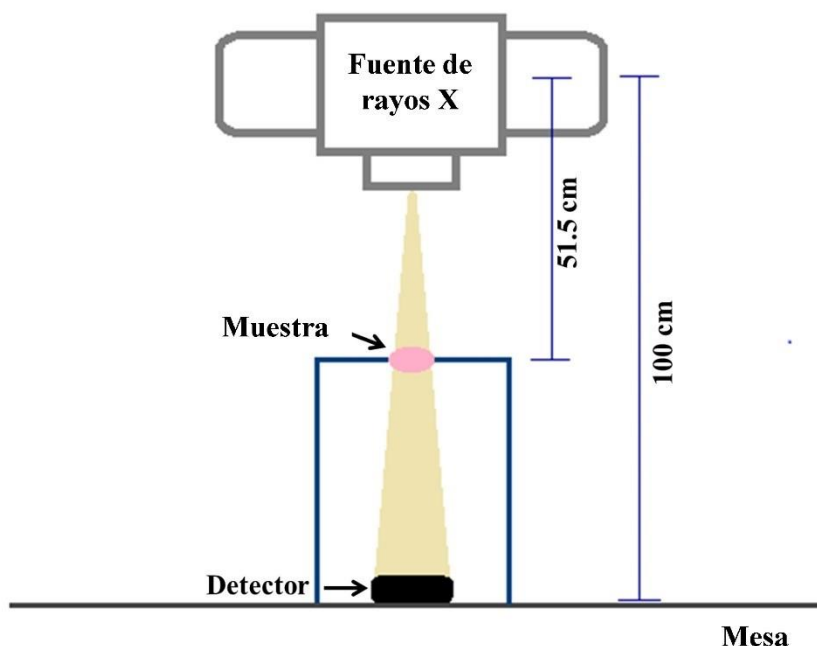


Figura 5. Montaje del experimento de atenuación (elaboración propia).

Se obtuvieron mediciones de la intensidad del haz de rayos X antes y después de atravesar las muestras que corresponden a los materiales diseñados. Para ello, se utilizó un detector de radiación. Con esta información, se obtuvieron valores de cantidades que caracterizan que tan fácilmente un material puede ser atravesado por un haz de rayos X, es decir, valores de coeficiente de atenuación lineal, coeficiente de atenuación másico, así como valores de espesores que necesitan tener los nanocompuestos para poder atenuar la intensidad del haz de radiación inicial a la mitad y a la décima parte.

Los resultados mostraron que los nanocompuestos elaborados con 50% de nanoestructuras, tienen un coeficiente de atenuación similar o mayor al del plomo en casi todo el rango de energías, dependiendo de la nanoestructura empleada, tal como se muestra en la Figura 6.

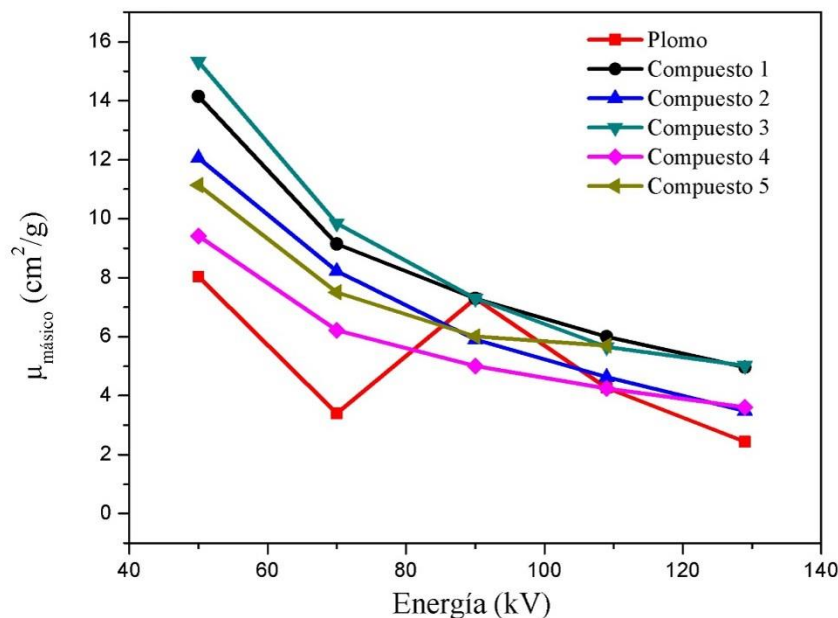


Figura 6. Coeficientes de atenuación másico para compósitos de PVC/estructuras (elaboración propia).

Los materiales elaborados reducen al 10% la intensidad del haz de rayos X en energías de radiodiagnóstico con espesores de 2.20 mm. Lo cual es factible para la aplicación como blindaje de rayos X, debido a que los nuevos materiales deben ser ligeros y flexibles, lo cual fue comprobado mediante el análisis de propiedades mecánicas, encontrando que los nanocompuestos adquieren la propiedad de tenacidad mediante el entrecruzamiento. A su vez, mediante la aplicación del principio de Arquímedes se obtuvieron las densidades de cada uno de los nanocompuestos, las cuales son menores o iguales a 2.24 g/cm^3 , siendo los nanocompuestos más livianos que el plomo, el cual tiene una densidad de 11.35 g/cm^3 .

Por otro lado, al someter los materiales a pruebas de toxicidad, utilizando células de piel humana, se demostró que los nanocompuestos no son tóxicos. En la Figura 7, se muestran imágenes de células de piel humana que fueron expuestas y no expuestas por 24 horas a los nanocompuestos (haciendo uso de extractos). En cada

una de ellas, se observan células en cantidades similares, sin daño alguno, por lo que se puede concluir que los nanocompuestos elaborados no son tóxicos para la piel. Las imágenes corresponden a fotografías tomadas con una cámara Nikon D750 con lente macro de 105 mm acoplada a tubos de extensión de 12 mm, 20 mm y 36 mm.

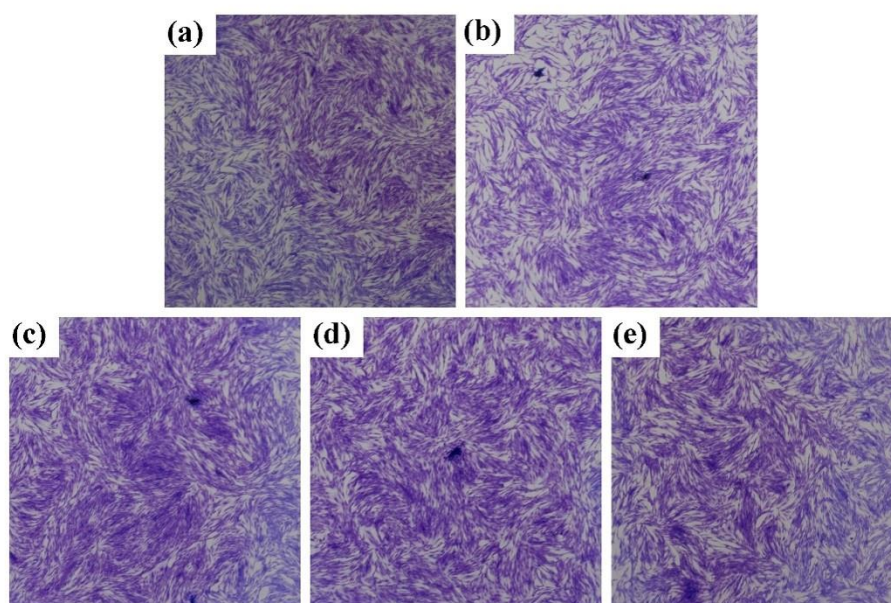


Figura 7. Imágenes de células de piel humana no expuestas (a) y expuestas a extractos de nanocompuestos de PVC cargados con diferentes nanoestructuras (b-e), incubadas durante 1 día (elaboración propia).

Conclusiones

Actualmente el diseño de materiales atenuadores de radiación libres de plomo es algo actual que se está investigando. Sin embargo, la investigación aun es temprana, por lo que hacen falta esfuerzos para poder llegar a un diseño que cumpla con las propiedades deseadas, además de ser económico.

Los nanocompuestos investigados representan una alternativa eficaz, debido a que presentan buena propiedad de atenuación, además de ser ligeros y no tóxicos, por lo que pudieran ser utilizados en la elaboración de aditamentos protectores de radiación en el área de radiodiagnóstico.

Sin embargo, el uso de radiaciones en el área médica es muy amplio, por lo que es necesario realizar investigaciones con el uso de otros materiales, así como evaluaciones de atenuación de radiación a energías mayores.

Agradecimientos

Adriana G. Núñez Briones agradece al CONACYT el apoyo financiero durante sus estudios de doctorado a través de la beca número 552916 y a CIQA por el apoyo durante su estancia postdoctoral. Gracias al Hospital Universitario de Saltillo y A. Barrón por los experimentos de atenuación. Gracias a la Dra. Ena Delya Bolaina Lorenzo por las pruebas de toxicidad.

Referencias

- Abbas, M. I., El-Khatib, A. M., Dib, M. F., Mustafa, H. E., Sayyed, M. I. & Elsafi, M. (2022). The Influence of Bi_2O_3 Nanoparticle Content on the γ -ray Interaction Parameters of Silicon Rubber. *Polymer*. 14(5): 1048.
- Abdalsalam, A.H., Şakar, E., Kaky, K.M., Mhareb, M.H.A., Şakar, B.C., Sayyed, M.I. & Gürol, A. (2020). Investigation of gamma ray attenuation features of bismuth oxide nano powder reinforced high-density polyethylene matrix composites. *Radiation Physics and Chemistry*. 168: 108537.
- Ambika, M.R., Nagaiah, N., Harish, V., Lokanath, N.K., Sridhar, M.A., Renukappa, N.M. & Suman, S.K. (2017). Preparation and characterisation of Isophthalic- Bi_2O_3

polymer composite gamma radiation shields. *Radiation Physics and Chemistry*. 130: 351–358.

Cecconi, A., Li, C. H. P., Camean, M. P., Cruz-Gonzalez, I. & Monzonís, A. M. (2023). Protección radiológica en ecocardiografía intervencionista. Recomendaciones de la SEC-Asociación de Imagen Cardíaca/SEC-Asociación de Cardiología Intervencionista. *Revista Española de Cardiología*.

Cherkashina, N.I., Pavlenko, V.I. & Noskov, A.V. (2019). Radiation shielding properties of polyimide composite materials. *Radiation Physics and Chemistry*. 159: 111–117.

Dominguez C.E. (2014). *Fundamentos de Protección Radiológica. Nivel: Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE)*. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México. 73-83 Pp.

Elsafi, M., Almuqrin, A. H., Almutairi, H. M., Al-Saleh, W. M. & Sayyed, M. I. (2023). Grafting red clay with Bi₂O₃ nanoparticles into epoxy resin for gamma-ray shielding applications. *Scientific Reports*. 13(1): 5472.

El-Sharkawy, R. M., Abdou, F. S., Gizawy, M. A., Allam, E. A. & Mahmoud, M. E. (2023). Bismuth oxide nanoparticles (Bi₂O₃ NPs) embedded into recycled-Poly (vinyl chloride) plastic sheets as a promising shielding material for gamma radiation. *Radiation Physics and Chemistry*. 208: 110838.

Gallegos Díaz, E. F. (2010). *Las radiaciones ionizantes: una realidad cotidiana*. Sociedad Española de Sanidad Ambiental, Universidad Politécnica de Madrid.

Güngör, A., Akbay, I.K., Yaşar, D. & Özdemir, T. (2018). Flexible X/Gamma ray shielding composite material of EPDM rubber with bismuth trioxide: mechanical, thermal investigations and attenuation tests. *Progress in Nuclear Energy*. 106: 262–269.

Kaewpirom, S., Chousangsunton, K. & Boonsang, S. (2022). Evaluation of Micro- and Nano-Bismuth (III) Oxide Coated Fabric for Environmentally Friendly X-Ray Shielding Materials. *ACS omega*. 7(32): 28248-28257.

Korbekandi, H. & Iravani, S. (2012). *Silver Nanoparticles*, en: A.A. Hashim (Ed.), The Delivery of Nanoparticles, InTech, 3-36 Pp.

Hashemi, S.A., Mousavi, S.M., Faghihi, R., Arjmand, M., Sina, S. & Amani, A.M. (2018). Lead oxide-decorated graphene oxide/epoxy composite towards X-Ray radiation shielding. *Radiation Physics and Chemistry*. 146: 77–85.

Hubbell J.H. & Seltzer S.M. (2004) Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z =1 to 92 and 48 additional substances of Dosimetric Interest. *NIST Standard Reference Database*. 126.

Intom, S., Kalkornsurapranee, E., Johns, J., Kaewjaeng, S., Kothan, S., Hongtong, W. & Kaewkhao, J. (2020). Mechanical and radiation shielding properties of flexible material based on natural rubber/Bi₂O₃ composites. *Radiation physics and chemistry*. 172: 108772.

Liu, L., Zhang, L., Hu, S., Wen, S. & Wei, Z. (2014). *U.S. Patent No. 8,728,349*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Low I.M. & Azman N.Z.N. (2020). *Polymer Composites and Nanocomposites for X-Rays Shielding*. Springer, Singapore.

Mayorga Betancourt, M. A., Plazas Jiménez, S. E. & Cruz Salazar, E. (2014). Materiales libres de plomo para atenuación de radiaciones ionizantes en protección radiológica. *Ingenium*. 15(30).

Nambiar, S., Osei, E. K. & Yeow, J. T. (2013). Polymer nanocomposite-based shielding against diagnostic X-rays. *Journal of applied polymer science*. 127(6): 4939-4946.

Núñez-Briones, A. G., Benavides, R., Martínez-Pardo, M. E., Carrasco-Abrego, H., Kotzian-Pereira-Benavides, C., Espejo-Villalobos, D. & García-Cerda, L. A. (2022). Effect of gamma dose rate in the crosslinking of PVC composites used for radiation protection in radiology. *Radiation physics and chemistry*. 191, 109866.

Núñez-Briones, A. G., Benavides, R., Bolaina-Lorenzo, E. D., Martínez-Pardo, M. E., Kotzian-Pereira-Benavides, C., Mendoza-Mendoza, E. & Garcia-Cerda, L. A. (2023). Nontoxic flexible PVC nanocomposites with Ta₂O₅ and Bi₂O₃ nanoparticles for shielding diagnostic X-rays. *Radiation Physics and Chemistry*. 202: 110512.

OMS, Organización Mundial de la Salud (2023). Efectos en la salud de las radiaciones ionizantes, en: *Organización Mundial de la Salud*. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/gzu52>. Fecha de consulta: 12 de noviembre de 2023.

Pavlenko, V.I., Cherkashina, N.I. & Yastrebinsky, R.N. (2019). Synthesis and radiation shielding properties of polyimide/Bi₂O₃ composites. *Heliyon*. 5 (5): e01703.

Petrone, C. (2021). EPI de protección contra la radiación ionizante. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Poveda, J. F. & Plazas, M. C. (2020). Elementos de protección radiológica en salas de intervencionismo. *Revista Colombiana de Cardiología*. 27: 82-87.

Puerta-Ortiz, J. A. & Morales-Aramburo, J. (2020). Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. *Revista Colombiana de Cardiología*. 27: 61-71.

Sociedad Argentina de Pediatría. (2018). Radioprotección, en *Twitter* [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/hwk79>. Fecha de consulta: 12 de noviembre de 2023.

Zarei M., Sina S. & Hashemi S.A. (2021). Superior X-ray Radiation Shielding of Biocompatible Platform Based on Reinforced Polyaniline by Decorated Graphene Oxide with Interconnected Tungsten-Bismuth-Tin complex. *Radiation Physics and Chemistry*. 109588.