

SIMULACIONES DE MATERIALES SIN PLOMO PARA ATENUACIÓN DE RADIACIONES IONIZANTES

Cruz, S.E.¹ Plazas, J. S.² y Mayorga, M.A.³

¹ Universidad-ECCI. Programa de Ingeniería Biomédica.
ecruzs@ecci.edu.co

² Universidad-ECCI. Programa de Ingeniería de Plásticos.
splazasj@ecci.edu.co

³ Universidad-ECCI. Programa de Ingeniería Mecánica.
mmayorgab@ecci.edu.co

RESUMEN

En este trabajo se presenta la fase preliminar de simulación y análisis teórico para el desarrollo materiales compuestos de base polimérica, cargados con elementos y compuestos atenuadores de radiaciones ionizantes libres de plomo, para uso como barreras rígidas, flexibles y en prendas de protección personal para uso en servicios de medicina nuclear y radiodiagnóstico. Las simulaciones fueron realizadas utilizando las bases de datos del National Institute of Standards and Technology, y el software WinXcom, el cual permite la simulación teórica de elementos, compuestos y sus mezclas, generando los respectivos coeficientes de atenuación. Los resultados se compararon contra los coeficientes de atenuación del plomo puro en el rango de energías de 30keV a 1MeV, rango comúnmente utilizado en el campo clínico. Se obtuvieron coeficientes de atenuación teóricos cercanos a los del plomo.

1. INTRODUCCIÓN

La radiación es un serio factor de riesgo y preocupación en instalaciones de potencia nuclear, en sistemas de radiografía industriales o médicos, en procesos de generación de radioisótopos, en aceleradores de partículas, y otras varias circunstancias. La atenuación de estas radiaciones para impedir que cause daño físico a los trabajadores y sus entornos son un aspecto importante en la operación de equipos que emiten rayos potencialmente dañinos. Preservar tanto la seguridad humana como la de los materiales estructurales de la instalación que pueden verse comprometidos por la exposición a la radiación, son preocupaciones vitales, así como la protección de equipos sensibles dentro de las instalaciones, como los dispositivos electrónicos y la película fotográfica. Debido a la alta capacidad de penetración de las radiaciones utilizada en medicina nuclear, el plomo metálico (Pb) es utilizado ampliamente como blindaje contra la radiación. Sin embargo, este elemento puede presentar un peligro para la salud debido a que el polvo de plomo se puede retirar fácilmente de las superficies de objetos elaborados con él. El polvo de plomo puede pasar al aire, contaminar pisos y otras superficies cercanas, y ser inhaladas inadvertidamente o ingerida por los pacientes [1].

El blindaje contra la radiación se basa en el principio de atenuación, o sea la capacidad de reducir el efecto de un rayo u onda mediante el bloqueo o rebote de partículas a través de un material de barrera. Las partículas cargadas pueden ser atenuadas por la pérdida de energía al

reaccionar con los electrones en la barrera, mientras que los rayos X y la radiación gamma son atenuadas mediante mecanismos de fotoemisión, dispersión, o la producción de pares [2].

Las formas típicas de blindaje para estas radiaciones incluyen materiales rígidos con portabilidad limitada, como el hormigón de alta densidad, los ladrillos de plomo, las placas de acero y piscinas de enfriamiento llenas de agua. La atenuación de las radiaciones gamma por estos materiales ha sido ampliamente estudiada y documentada. Además de estos materiales clásicos, se han venido desarrollando materiales compuestos que van desde avances simples, como mantas de lana de plomo cubiertas protectores de plástico, hasta materiales más avanzados, como componentes moldeados a pedido elaborados a partir de metales de alta densidad dispersos en polímeros orgánicos [3].

En este trabajo se evaluaron teóricamente seis matrices poliméricas termoplásticas de uso genérico (PET, PE, PVC, PP, PS y PC), dos matrices poliméricas elastoméricas (NR y SBR), tres elementos atenuadores (Pb, Sn y W), y nueve compuestos de reconocido poder atenuante BaO, SnO, BaSO₄, W₂O₃, WO₃, WC, Bi₂O₃, BiIO y BiI₃). Para Rayos X se trabajó con energías entre 30 keV y 150 keV y para fotones γ con energías entre 140 keV y 1.25 MeV, que son las energías más comunes en procedimientos de Radiodiagnóstico y Medicina Nuclear. Finalmente la mejor matriz atenuadora se mezcló con el elemento y compuesto de mejor desempeño para los propósitos del trabajo (atenuación de Rayos-X y Gamma) y se evaluaron a concentraciones de 10%, 20%, 30%, 40% y 50% [4].

Por tanto, a partir de la investigación en nuevos materiales de baja toxicidad que generen menor impacto ambiental, viables en cuanto a usabilidad y disponibilidad de la materia prima, y que en este contexto, atenúen las radiaciones ionizantes hasta los límites aceptables de acuerdo a las Normas Básicas Internacionales de Seguridad (NBS) del ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, se puede optimizar la protección radiológica mitigando los efectos conexos del uso de plomo.

2. MÉTODO, FUNDAMENTOS y RESULTADOS

2.1. Método

El estudio teórico de los materiales atenuadores se basó en la probabilidad de interacción de la radiación con la materia. Esta interacción depende de la energía de los fotones incidentes, de los átomos y su configuración en el material con el cuál se interactúa. Por tal razón, se abordó la probabilidad de interacción a partir de las bases de datos del NIST- National Institute of Standards and Technology consolidadas a partir de su PML- Physical Measurement Laboratory.

Este laboratorio cuenta entre otras investigaciones, con métodos espectroscópicos y normas para infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X, y la radiación de rayos gamma; investiga la estructura y dinámica de los átomos, las moléculas y biomoléculas. Junto con las bases de datos del NIST, se empleó el software WinXCom, un programa para el cálculo de los coeficientes de atenuación de Rayos X, desarrollado por The Technical University of Denmark.

Los fundamentos físicos de las bases de datos del NIST que permitieron los datos utilizados para este trabajo teórico, se presentan a continuación. Se realizó una evaluación teórica de los

coeficientes de atenuación de polímeros termoplásticos de uso general, como el polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietilentereftalato (PET), policloruro de vinilo (PVC) y policarbonato (PC), Así como polímeros elastoméricos como caucho natural (NR) y caucho de estireno-butadieno (SBR), seleccionados por ser polímeros de amplio uso y disponibilidad.

Este único criterio de selección de las matrices poliméricas a evaluar, pues los materiales atenuadores son por lo general costosos y se requiere que la matriz polimérica sea de bajo costo, como los son algunos de estos plásticos de consumo masivo. Estructuralmente producen láminas con suficiente resistencia mecánica para soportar el uso y contener adecuadamente los materiales de carga atenuadores; siempre y cuando, no superen los contenidos de cargas o rellenos que puedan reducir drásticamente las propiedades mecánicas de las matrices poliméricas haciéndolas inapropiadas para uso en blindajes. Por esta razón, se limitará la simulación de las mezclas a contenidos máximos de 50%. Aunque solo pruebas mecánicas reales determinarán si son viables contenidos tan elevados de material atenuador.

El criterio para la selección de los elementos y compuestos atenuadores es el peso atómico; teniendo como referente el elemento atenuador de mayor uso, el plomo ($Z=82$ y densidad de $11,36 \text{ g/cm}^3$). Con estos criterios se evaluaron los coeficientes de atenuación de elementos y compuestos de alto número atómico (Z) y utilizados en otras investigaciones [4], tales como estaño (Sn, $Z=50$) y Tungsteno (W, $Z=74$) óxido de bario (BaO), óxido de estaño (SnO), óxido de bismuto (Bi_2O_3), óxidos de tungsteno (WO_2 , W_2O_3), carburo de wolframio (WC), sulfato de bario (BaSO_4), Yoduro de Bismuto (BiI_3) y oxoyoduro de bismuto (III) (BiIO) [4]. Una vez realizada la evaluación de cada material por separado, se seleccionaron los de mayores coeficientes de atenuación (polímero y sustancia atenuadora), los cuales se mezclaron en proporciones del 10%, 20%, 30%, 40% y 50% en contenido de material atenuador.

El método a seguir empleando el software Win XCom fue:

- Evaluación del coeficiente de atenuación de las matrices poliméricas puras.
- Calculo del coeficiente de atenuación de los elementos y compuestos atenuadores.
- Determinación del coeficiente de atenuación del mejor elemento atenuador mezclado con polímero de mejor desempeño atenuador en proporciones de hasta 50%.
- Determinación del coeficiente de atenuación del mejor compuesto atenuador mezclado con polímero de mejor desempeño atenuador en proporciones de hasta 50%.

2.2. Fundamentos

2.2.1. El Coeficiente de Atenuación Másico, μ/ρ

Asumiendo un haz estrecho de fotones monoenergéticos con una intensidad incidente I_0 , que interactúa con una capa de material de espesor X y densidad ρ , emerge con intensidad I . La ecuación (1) representa esta situación.

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\frac{\mu}{\rho}x} \quad (1)$$

La ecuación (1) se puede reescribir:

$$\frac{\mu}{\rho} = x^{-1} \ln \frac{I_0}{I} \quad (2)$$

Los μ/ρ dependen en gran medida de los valores teóricos de la sección eficaz total por átomo, σ_{tot} , la cual está relacionada con μ/ρ según la ecuación (3).

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma_{tot}}{uA} \quad (3)$$

El coeficiente de atenuación, las secciones eficaces de interacción fotónica y las otras magnitudes relacionadas, son funciones de la energía de los fotones. La sección eficaz total se puede escribir como la suma de las contribuciones (Ecuación (4)) de las principales interacciones de los fotones [5]:

$$\sigma_{tot} = \sigma_{pe} + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{pair} + \sigma_{trip} + \sigma_{phn} \quad (4)$$

2.2.2. El Coeficiente Másico de absorción de energía, μ_{en}/ρ

Los métodos utilizados para calcular el coeficiente másico de absorción de energía, μ_{en}/ρ , se hayan mediante el coeficiente másico de transferencia de energía, μ_{tr}/ρ . A partir de este coeficiente másico de transferencia es posible obtener el KERMA [5].

2.2.3. Procedimiento con las bases de datos del NIST.

Para la presente simulación se emplearon las Tablas 1, 2, 3 y 4 del NIST: Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements $Z = 1$ to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest Mixtures and compounds [3]. Para los elementos tabulados en la Tabla 3 del National Institute of Standards and Technology-NIST; los cálculos se hicieron empleando la Formula (5)

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma_{pe} + \sigma_{coh} + \sigma_{incoh} + \sigma_{pair} + \sigma_{trip}}{uA} \quad (5)$$

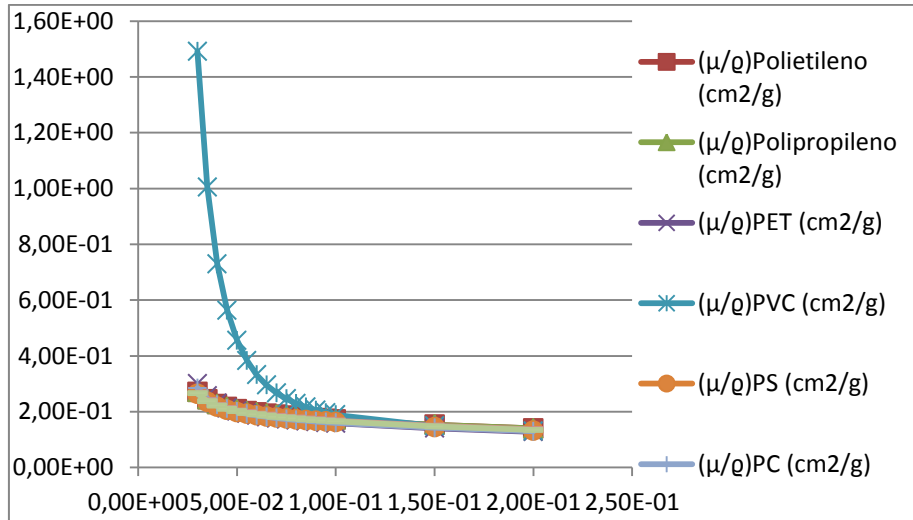
Los valores de los coeficientes de atenuación másicos, μ/ρ , para las 48 mezclas y compuestos (asumiendo homogeneidad total) están reportados en la Tabla 4 del NIST, y fueron obtenidos por la simple ley de aditividad (Ecuación (6)), principio que también será utilizado para el cálculo de las mezclas propuestas en este estudio.

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (6)$$

Con los datos del NIST y el Software WinXCom, se realizaron las simulaciones y las gráficas de los coeficientes de atenuación representados en las ordenadas (cm^2/g) dentro de los rangos de energía incidentes en Mega Electronvoltios (MeV) graficados en las abscisas, tanto para polímeros, elementos, compuestos y mezclas.

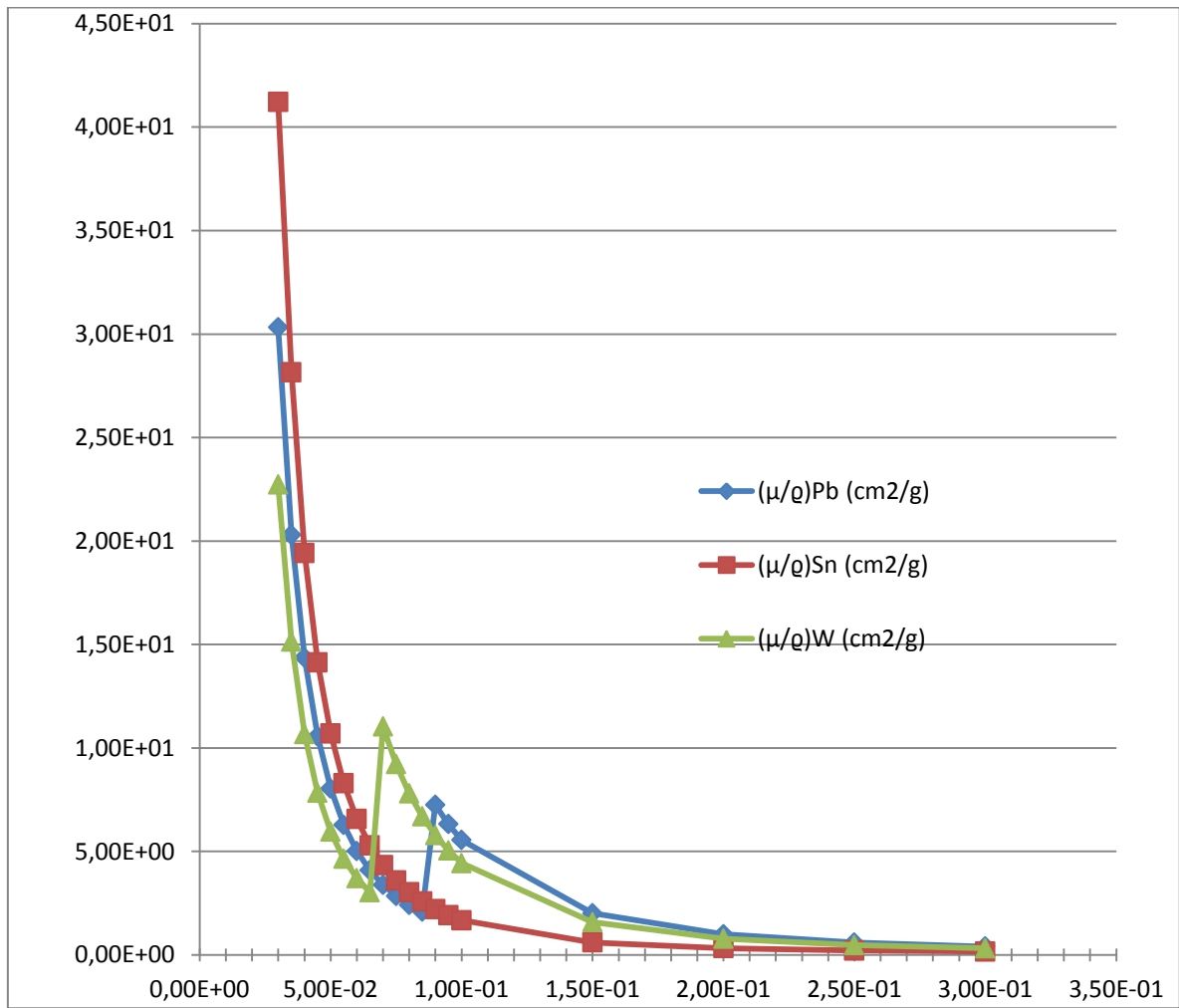
2.3. Resultados

2.3.1. Matrices poliméricas. Los resultados de la atenuación de las matrices poliméricas se presentan en la Grafica-1



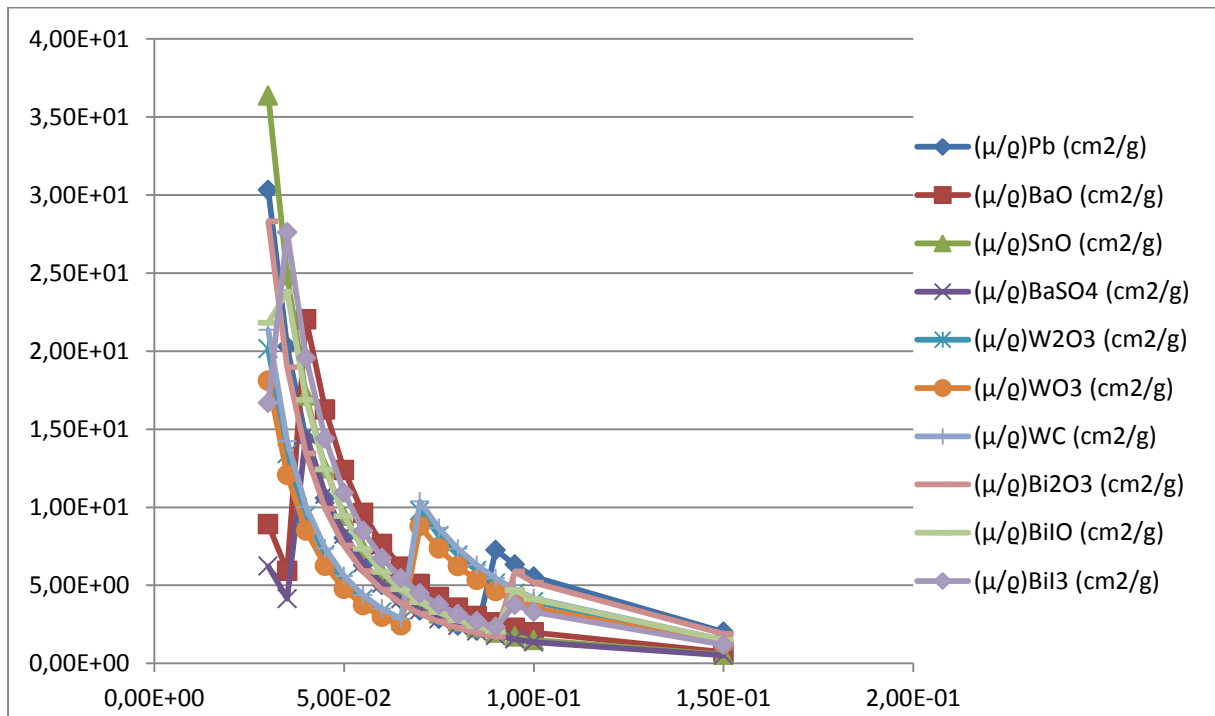
Grafica-1 Intensidad energética MeV (abscisas) vs Coeficientes de atenuación másicos para PE, PP, PET, PVC, PS, PC, NR y SBR (cm^2/g)

2.3.2. Elementos atenuadores. Los resultados de la atenuación de los elementos Pb, Sn y W se presentan en la Grafica-2



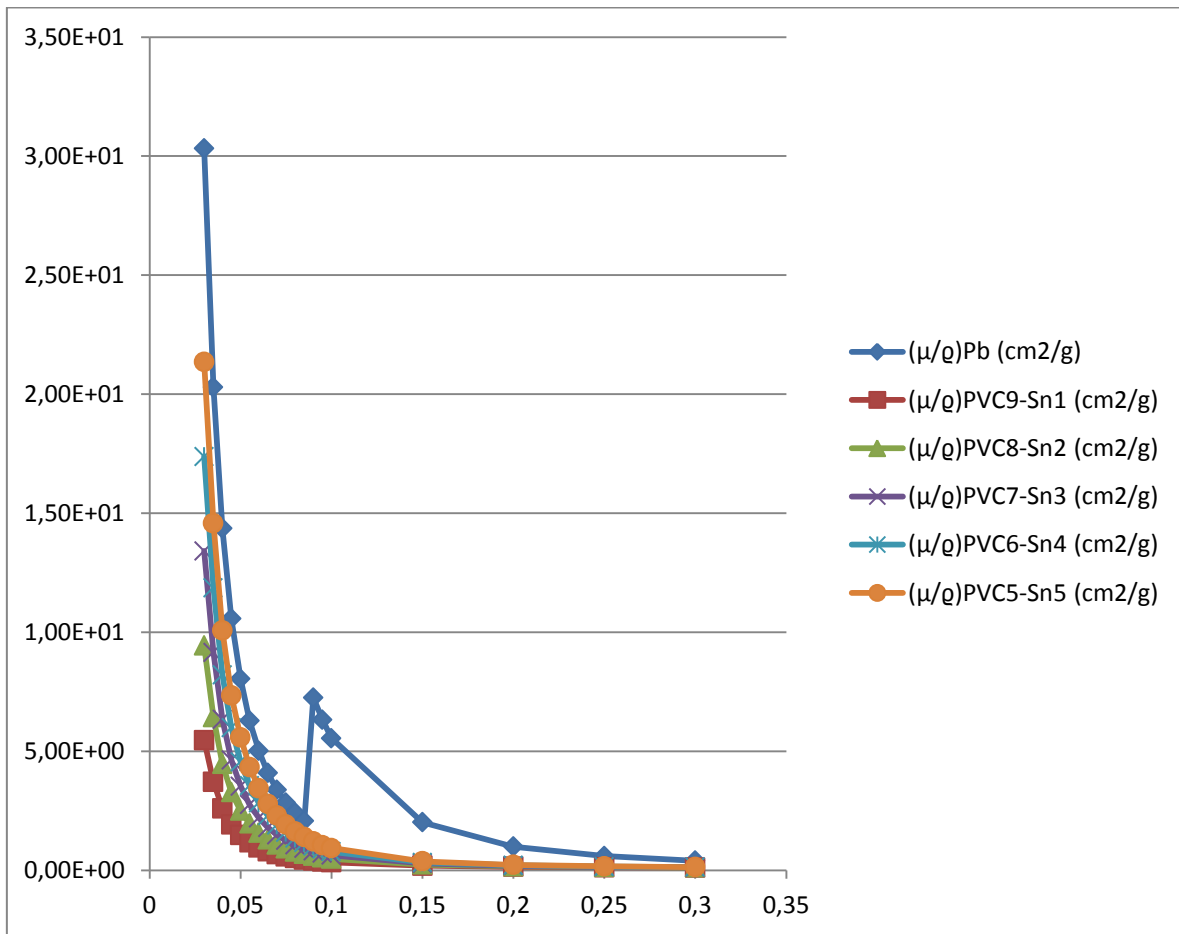
Grafica-2 Intensidad energética MeV (abscisas) vs Coeficientes de atenuación másicos para Pb, Sn y W (cm²/g)

2.3.3. Compuestos atenuadores. Los resultados de la atenuación de los compuestos BaO, SnO, Bi₂O₃, WO₂, W₂O₃, WC, BaSO₄, BiI₃ y BiIO se presentan en la Grafica-3



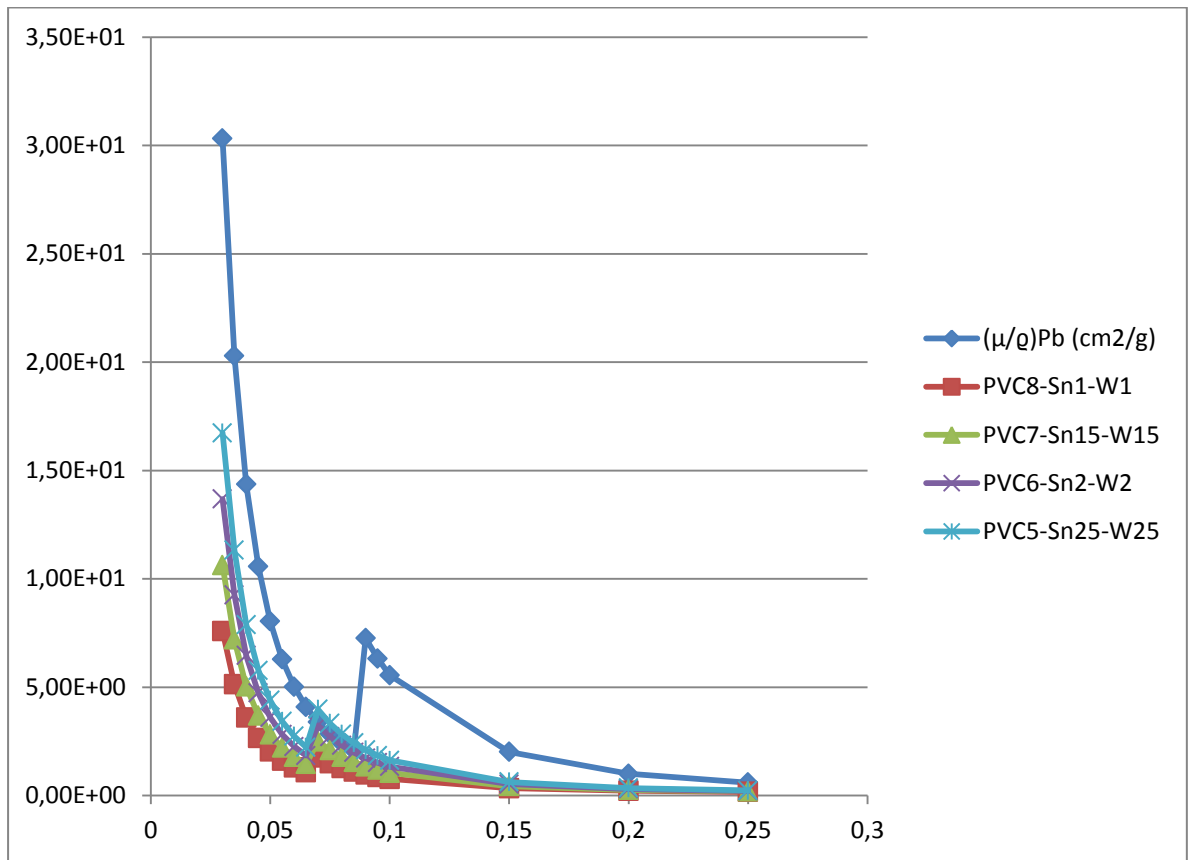
Grafica-3 Intensidad energética MeV (abscisas) vs Coeficientes de atenuación máscicos para BaO, SnO, Bi₂O₃, WO₂, W₂O₃, WC, BaSO₄, BiI₃ y BiIO (cm^2/g)

2.3.4. Mezclas PVC-elementos atenuadores. Los resultados de la atenuación de las mezclas PVC-Sn se presenta en la Grafica-4



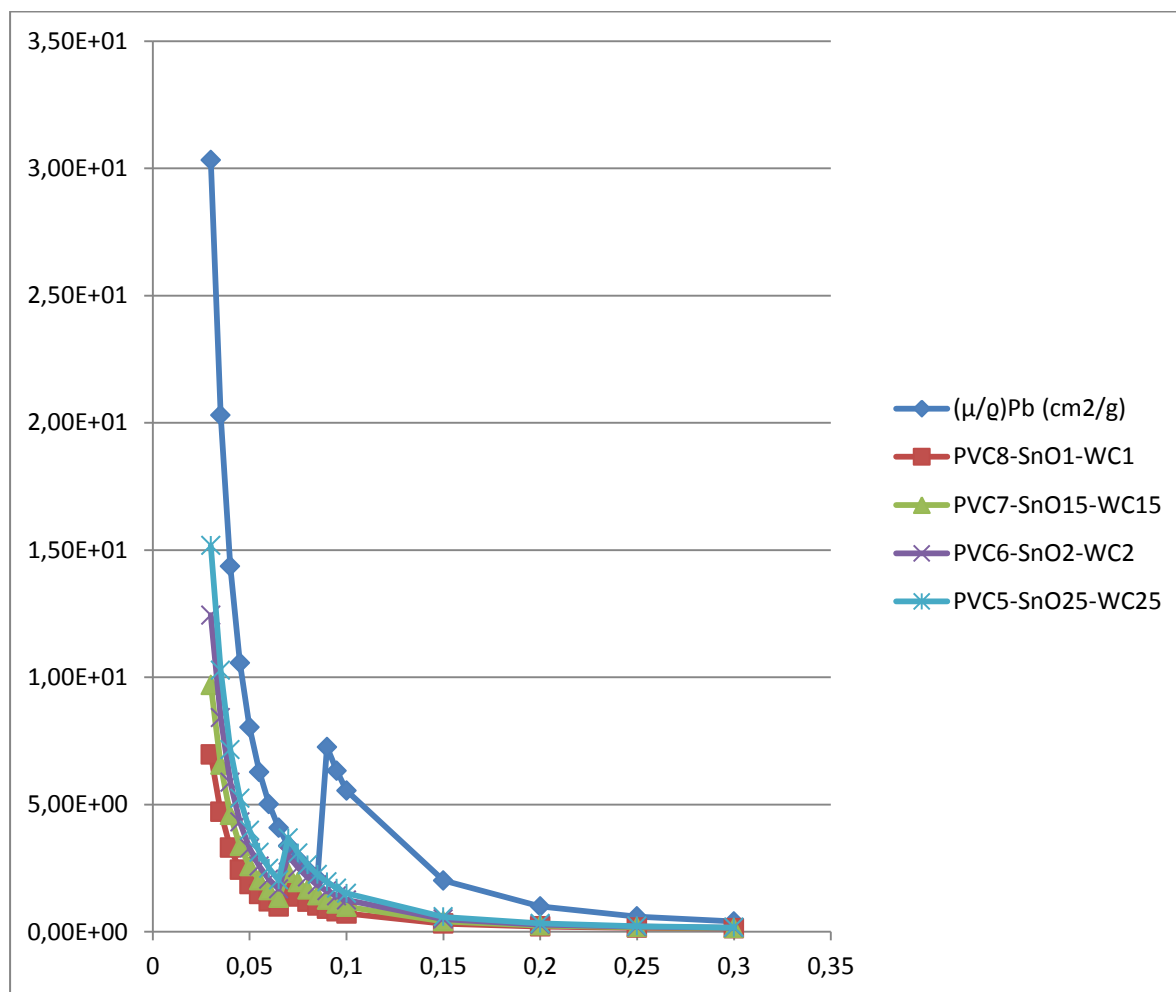
Grafica-4 Intensidad energética MeV (abscisas) vs Coeficientes de atenuación másicos para mezclas PVC-Sn (cm²/g)

2.3.5. Mezclas ternarias PVC-elementos atenuadores. Los resultados de la atenuación de las mezclas PVC-Sn-W se presentan en la Grafica-5.



Grafica-5 Intensidad energética MeV (abscisas) vs Coeficientes de atenuación másicos para mezclas PVC-Sn-W (cm²/g).

2.3.6. Mezclas ternarias PVC-compuestos atenuadores. Los resultados de la atenuación de las mezclas PVC-SnO-WC se presentan en la Grafica-6



Grafica-6 Intensidad energética MeV (abscisas) vs Coeficientes de atenuación másicos para mezclas PVC-SnO-WC (cm²/g).

3. CONCLUSIONES

Los polímeros termoplásticos que sirven de matriz no son buenos atenuadores, por estar compuestos de átomos con bajo número atómico, principalmente carbono (C) e hidrógeno (H). Sin embargo el PVC destacó entre el grupo, por contener átomos de Cloro (Cl) más pesados (Gráfica-1).

Los metales como el estaño Sn atenúan cercano al Pb a bajas energías y el Tungsteno (W) lo hace mejor a altas energías (Gráfica-2).

Los compuestos de estaño como el SnO atenúan cercano al Pb a bajas energías y los compuestos de wolframio como WC lo hace mejor a altas energías (Gráfica-3).

Las mezclas PVC-Sn atenúan cercano al Pb a bajas energías (Gráfico-4) y las de PVC-W lo hacen mejor a altas energías, por lo que mezclas ternarias PVC-Sn-W pueden atenuar rayos X y gammas de formas más uniforme (Gráfica-5)

Las mezclas PVC-SnO₂ atenúan cercano al Pb a bajas energías y las de PVC-W lo hacen mejor a altas energías, por lo que mezclas ternarias PVC-SnO₂-WC pueden atenuar rayos γ y gammas de formas más uniforme (Gráfica-6).

En general, al aumentar el contenido de elemento o compuesto atenuador dentro de la matriz polimérica aumenta el coeficiente de atenuación másico, aproximándose más al del plomo, que es el referente en todos los casos estudiados.

4. REFERENCIAS

- [1] C. K. Hulbert S.M, «Is lead dust within nuclear medicine departments a hazard to pediatric patients?,» de *Journal of Nuclear Medicine Technology*, Virginia, 2009.
- [2] ThomasNet.com, «ThomasNet.com,» Materials Used in Radiation Shielding, [En línea]. Available: <http://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/radiation-shielding-materials>. [Último acceso: 12 2014].
- [3] D. R. McAlister, «Eichrom technologies,» [En línea]. Available: <http://www.eichrom.com/PDF/gamma-ray-attenuation-white-paper-by-d.m.-rev-4.pdf>. [Último acceso: 19 12 2014].
- [4] E. E. O. Mevlut ERTAN, «GOOGLE-patentes,» Elastic material for protection against ionised radiation, [En línea]. Available: <http://www.google.com/patents/WO2013100875A2?cl=en>. [Último acceso: 21 12 2014].
- [5] NIST, «Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients,» Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients, [En línea]. Available: <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/>. [Último acceso: 15 06 2014].

