

Arena como dosímetro termoluminiscente para dosis terapéuticas

Areia como dosímetro termoluminescente de doses terapéuticas

Sand as thermoluminescent dosimeter to therapeutic doses

Daniel Ricaurte¹, Juana Salcedo² y Rafael Cogollo³

Recepción: 19-ago-2009/Modificación: 07-nov-2009/Aceptación: 09-nov-2009

Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

Este trabajo describe las características termoluminiscentes de arena proveniente de las playas de Coveñas para su uso como dosímetro en dosis terapéuticas. Las muestras seleccionadas, tratadas térmicamente a 400°C por una hora, fueron irradiadas a diferentes dosis usando una unidad de ⁶⁰Co Theratron 780C en aire a temperatura ambiente. La lectura se realizó en un Harshaw TLD 4500. Las principales propiedades dosimétricas del material (curva de brillo, reproducibilidad de la respuesta, reutilización, linealidad y decaimiento térmico) han sido estudiadas en detalle. La curva de brillo de las muestras de arena presenta un pico TL alrededor de los 145°C. Los resultados muestran que el material tiene una respuesta lineal con la dosis desde 50 cGy hasta 1000 cGy. Las muestras de arena estudiadas se pueden utilizar como dosímetros termoluminiscentes para aplicaciones en diferentes áreas. La importancia de este trabajo radica en que la arena es una sustancia natural disponible en grandes cantidades, tiene bajo costo y puede usarse en física clínica para evaluar la dosis recibida por el paciente durante el tratamiento médico.

¹ Magíster en Física, daniel_ricaurte@yahoo.com, profesor, Departamento de Física y Electrónica, Universidad de Córdoba, Montería-Colombia.

² Físico, jqintero8720@yahoo.com, auxiliar de investigación, Departamento de Física y Electrónica, Universidad de Córdoba, Montería-Colombia.

³ Magíster en Física, racopi2@yahoo.com, profesor, Departamento de Física y Electrónica, Universidad de Córdoba, Montería-Colombia.

Palabras claves: arena, termoluminiscencia, dosimetría.

Resumo

Este artigo descreve as características termoluminescentes de areia das praias de Coveñas, para utilização como um dosímetro em doses terapéuticas. As amostras selecionados tratadas a 400°C por una hora, foram irradiadas com doses diferentes, utilizando uma unidade de ^{60}Co Theratron 780C no ar em temperatura ambiente. A leitura foi feita em 4500 Harshaw TLD. As principais propriedades dosimétricas do material (curva do brilho, reprodutibilidade da resposta, reutilização, linearidade e decadência térmica) foram estudados em detalhe. A curva de brilho das amostras de areia tem um pico TL em torno de 145°C. Os resultados mostram que o material tem uma resposta linear com a dose de 50 cGy a 1000 cGy. As amostras de areia estudados podem ser utilizados como dosímetros termoluminescentes para aplicações em diferentes áreas. A importância deste trabalho é que a areia é uma substância natural, disponível em grandes quantidades, de baixo custo e pode ser usado em clínica física para avaliar a dose recebido pelo paciente durante o tratamento médico.

Palavras chaves: areias, termoluminescência, dosimetria.

Abstract

This work describes the characteristic thermoluminiscent of sand coming from Coveñas beaches, for its use as therapeutic dose dosimeter. The selected samples, annealed at 400°C during 1 hour, were irradiated to different doses using an unit of ^{60}Co Theratron 780C in air to ambient temperature. The reading was carried out in a Harshaw TLD 4500. The main dosimetric properties of the material (glow curve, response reproducibility, reutilization, linearity and thermal decay) have been studied in detail. The glow curve of the sand samples presents a peaks TL at about 145°C. The results show that the material has a linear response to the dose from 50 cGy until 1000 cGy. The studied sand samples can be used as thermoluminescent dosimeters for applications in different areas. The importance of this work is that the sand is a natural substance available in large quantities, low cost and can be used in clinical physics to evaluate the dose received by the patient during medical treatment.

Key words: sands, thermoluminescence, dosimetry.

1 Introducción

El proceso de irradiación en los centros en donde se trabaja con radiaciones ionizantes requiere un programa de control de calidad [1]. La verificación de la

dosis absorbida es una parte esencial de tal programa y consiste simplemente en la comparación entre las dosis medidas con las dosis prescritas, ya sea para uso médico o industrial.

Aunque existen diferentes técnicas dosimétricas, la dosimetría termoluminiscente (TLD) es una de las más utilizadas para desarrollar este tipo de estudios y es, sin duda, la principal aplicación práctica de la termoluminiscencia (TL). En esta actividad la TL ha alcanzado un gran desarrollo y un elevado grado de aceptación entre la comunidad científica internacional desde los primeros trabajos de Daniels y colaboradores [2].

Desde entonces la TL se ha consolidado hasta considerarse en la actualidad como un método de medida de gran versatilidad que se adapta sin excesivas dificultades a la gran variedad de actividades científicas o técnicas en la que se requiera una determinación precisa de la dosis absorbida por irradiación. Tanto el modelo teórico [2, 3, 4] que se usa, como los sistemas dosimétricos, han sido ampliamente reportados en la literatura [5, 6].

Desde sus inicios han sido propuestos y probados todo tipo de materiales con el fin de ser utilizados en TLD, cuya amplia variedad va desde vidrios comunes [7, 8, 9] hasta arena de diferentes playas [10, 11, 12, 13, 14]. La arena es un material natural fácilmente disponible en grandes cantidades. Los constituyentes principales de la arena son el cuarzo y los feldespatos, los cuales son bastantes conocidos por exhibir termoluminiscencia [12]. Por estas propiedades algunos investigadores han considerado que la arena puede ser utilizada como dosímetro de radiación termoluminiscente o por Resonancia Paramagnética Electrónica [10, 11, 13, 14].

Vaijapurkar y Bhatnagar [10] describieron las características termoluminiscentes de la arena de Rajasthan (India) para su uso como un dosímetro TL Gamma de bajo costo disponible en tratamientos de radioterapia. En su trabajo encontraron una respuesta lineal desde unos pocos cGy a 2000 cGy, con una dosis mínima detectable de 3 cGy.

Posteriormente Vaijapurkar et alii [11] estudiaron las propiedades TL de la arena de Rajasthan para su uso como dosímetros de alta dosis gamma, encontrándose un cambio significativo en la forma de la curva de brillo para dosis superiores a 6 kGy; sin embargo, la posición del pico TL permanece igual (201°C). Estas muestras exhibieron una respuesta casi lineal por encima de 0,6 kGy, seguido por un comportamiento sublineal para dosis superiores.

Teixeira, Ferraz y Caldas usaron la técnica de EPR para estudiar muestras de arena de diferentes playas brasileñas como dosímetros de alta dosis [13]. Las propiedades dosimétricas reportadas fueron: reproducibilidad de la respuesta, reutilización, uniformidad del lote, rango de detección y respuesta de dosis. La respuesta de dosis mostró sublinealidad, y es proporcional a la raíz cuadrada de la dosis, con efectos de saturación evidentes después de 50 kGy.

Recientemente, Teixeira y Caldas [14] estudiaron muestras de arena de playas brasileñas para ser usadas como dosímetros termoluminiscentes de alta dosis en procedimientos rutinarios con radiaciones ionizantes. Las curvas de brillo termoluminiscente de las muestras expuestas a dosis de radiación gamma entre los 5 Gy y los 80 kGy presentaron dos picos TL aproximadamente 110 y 170°C. Los resultados de estos investigadores indican que las pastas sinterizadas pueden usarse repetidamente para dosimetría termoluminiscente de alta dosis en varias áreas de aplicación de radiaciones ionizantes. Con el propósito de contribuir a esta búsqueda, en este trabajo se describen las principales características dosimétricas de muestras de arena de las playas de Coveñas (Colombia), las cuales podrían usarse como dosímetros Termoluminiscentes en radioterapia.

2 Materiales y Métodos

Con el objeto de remover las impurezas orgánicas, las muestras de arena fueron lavadas con ácido clorhídrico 1 N. Para ello, por cada 5 g de arena, a cada muestra se le agregaron 3 ml de HCl por 45 minutos a temperatura ambiente. La arena era removida cada cinco minutos para que el área superficial de los granos interactuara con el ácido. El procedimiento anterior se repitió en tres oportunidades, hasta que se observó que las impurezas orgánicas superficiales desaparecieron en mayor grado. Luego se retiró el ácido por medio de lavados con agua destilada y finalmente las muestras fueron secadas a 75°C durante una hora.

Con el propósito de determinar elementos, compuestos y minerales presentes en las muestras, se realizó un análisis químico elemental y un análisis estructural. El análisis químico elemental fue realizado por fluorescencia de rayos X (FRX) en el Laboratorio de Gestión y Tecnología de la empresa Cerro Matoso S. A. usando un equipo Philips FRX 2400, a temperatura ambiente;

para lo cual se emplearon 5 g de muestra y los resultados son el promedio aritmético de varias medidas. El análisis estructural se realizó por medio de difracción de rayos X (DRX). Los espectros se obtuvieron, a temperatura ambiente, en un difractómetro Philips PW 1710, usando como radiación incidente la línea $K\alpha_1$ del cobre ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$) operando con un voltaje en el tubo de 40 kV y una corriente de 30 mA, variando el ángulo de barrido entre $10^\circ < 2\theta < 70^\circ$ en pasos de 0,02 grados/s.

Antes del proceso de irradiación, las partículas magnéticas presentes en las muestras fueron removidas usando imanes apropiados (~ 5000 gauss), para minimizar la absorción de señales TL, como fue sugerido por Vaijapurkar y Bhatnagar [10]. Posteriormente se les aplicó un tratamiento térmico de 400°C durante una hora, seguido de una fase de enfriamiento en aire hasta temperatura ambiente. Para llevar a cabo estos tratamientos se empleó un horno Lindberg/Blue UP150[®]. Este tratamiento tiene por objeto reducir la señal natural del material antes de cada irradiación y permitir su reutilización como había sido sugerido por Teixeira, Ferraz y Caldas [13].

Las irradiaciones fueron realizadas en aire a temperatura ambiente ($\sim 32^\circ\text{C}$) usando una unidad de ^{60}Co Theratron 780C a una distancia de 80 cm de la fuente, dentro de un campo de radiación de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ en el plano de irradiación. Las muestras de arena en polvo, con un tamaño de grano aproximado de 100 micras, de 30 mg de masa cada una, fueron colocadas entre dos placas de acrílico de 5 mm de espesor, con el propósito de alcanzar condiciones de equilibrio electrónico.

La lectura fue realizada en un TLD 4500 fabricado por Bicon[®], usando para ello la plancheta de calentamiento del equipo. Durante el proceso se usó una temperatura de precalentamiento de 50°C , a partir de la cual se realizó la adquisición de datos, a una tasa de 10°C/s hasta alcanzar una temperatura máxima de 330°C , seguido de un calentamiento a 330°C . Para eliminar la contribución infrarroja, debido al calentamiento y reducir los efectos de la humedad durante el proceso, todas las lecturas se realizaron en una atmósfera de N_2 de alta pureza.

Todas las curvas de termoluminiscencia fueron analizadas con el programa de análisis simplificado WinREMS[®], capaz de resolver una curva compleja de termoluminiscencia. Este programa ajusta los puntos experimentales haciendo uso de la teoría cinética de primer orden [15].

3 Resultados y discusión

3.1 Análisis químico elemental

En la tabla 1 se presentan los resultados del análisis por FRX, en donde se han registrado solamente los elementos o compuestos con mayor presencia. De esta tabla es claro que las muestras presentan altas concentraciones de SiO_2 , componente principal del cuarzo y los feldespatos potásicos, minerales que exhiben TL. Del análisis también se encontraron bajas concentraciones de Ni, Fe, Cr_2O_3 , MnO, Co_3O_4 , P_2O_5 y otros compuestos que no se muestran en la tabla puesto que no representan interés industrial. La presencia de materiales magnéticos en los granos perjudica las propiedades dosimétricas del material [10], razón por la cual es importante el proceso de retiro de estas partículas, como se mencionó anteriormente.

Tabla 1: composición química (peso %) de las muestras

Ni	Fe	MgO	SiO_2	Al_2O_3	CaO
0,020	0,60	0.48	83,49	4,40	3,560

3.2 Análisis estructural

En la figura 1 se observa el patrón de difracción para la muestra de arena de la playa de Coveñas. En el difractograma se observan claramente un conjunto de picos o señales correspondientes a una mezcla mineral entre los que se destacan minerales pertenecientes al grupo de la sílice (cuarzo) como sus constituyentes principales y los feldespatos potásicos como la ortoclasa y feldespatos tipo plagioclasa. Entre los piroxenos (inosilicatos) se encontró la presencia de minerales de las series de la enstatita, dióxido y augita.

3.3 Respuesta natural y curva de brillo

En la figura 2 se muestran los espectros de emisión de una muestra de arena de Coveñas antes de ser tratada térmicamente, después del proceso térmico descrito anteriormente (sin irradiar) y su respuesta al recibir una dosis de 50 cGy. De la gráfica es claro, que aunque el tratamiento térmico no logra la

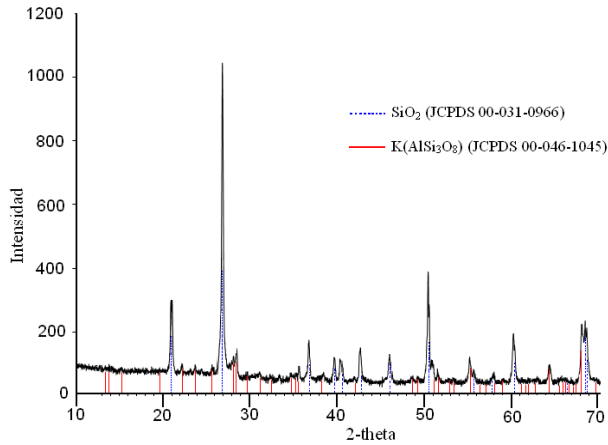


Figura 1: difractograma de rayos X para la playa de Coveñas. Se destaca la presencia de cuarzo (SiO_2) y ortoclasa ($\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$), minerales que exhiben termoluminiscencia

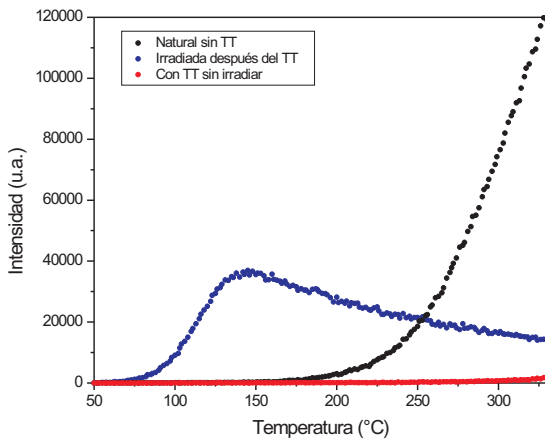


Figura 2: espectros TL de arena natural sin tratamiento térmico (TT), con un TT de 400°C por una hora y después de recibir una irradiación de 50 cGy

eliminación total de la señal de fondo, su efecto puede despreciarse cuando se le compara con la respuesta del material después de la irradiación.

En la figura 3 se observa la curva de brillo de una muestra de arena de la playa de Coveñas, la cual fue irradiada a diferentes dosis. En ella se observa como la intensidad de la señal aumenta con la dosis. Note además, que la muestra exhibe una curva de brillo amplia cuyo valor máximo se localiza aproximadamente a 145°C, indistintamente de la dosis.

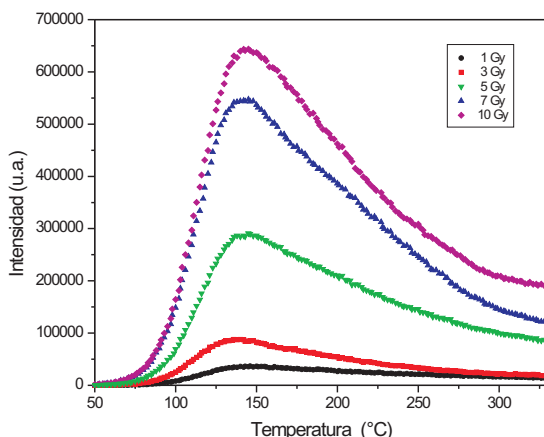


Figura 3: curva de brillo para una muestra de la playa de Coveñas irradiada a diferentes dosis

En los materiales termoluminiscentes las emisiones TL son esencialmente procesos relacionados con la presencia de impurezas (dopantes) que han sido introducidas natural o artificialmente en la red de la matriz anfitriona [15]. Estas impurezas generan niveles de energía específicos (trampas) en la banda de energías prohibidas situada entre la banda de valencia y la banda de conducción, que no existen en el material puro. Estos nuevos niveles pueden ser ocupados por los portadores de carga, electrones y/o huecos, liberados durante la irradiación.

Al observar las curvas TL de las muestras de arena, puede suponerse que éstas consisten en una superposición de dos o más señales TL. Esta respuesta está en concordancia con los resultados obtenidos en el análisis químico y estructural en donde se encontró una “mezcla de minerales” que podrían tener

distintas fases cristalográficas con diferentes “tipos” de defectos. Por lo tanto, es necesario hacer uso de técnicas de “deconvolución” computacional para separar las señales TL independientes y determinar los “parámetros cinéticos” según las diferentes teorías existentes [15, 16, 17].

Adicionalmente, y con el objeto de disminuir el decaimiento de la señal, a estas muestras se les realizó un tratamiento térmico de 100°C por 10 minutos, después del cual exhibieron una curva de brillo similar a la inicial, pero con un corrimiento en su pico principal de aproximadamente 45°C y una notable disminución en su intensidad, tal como se observa en la figura 4.

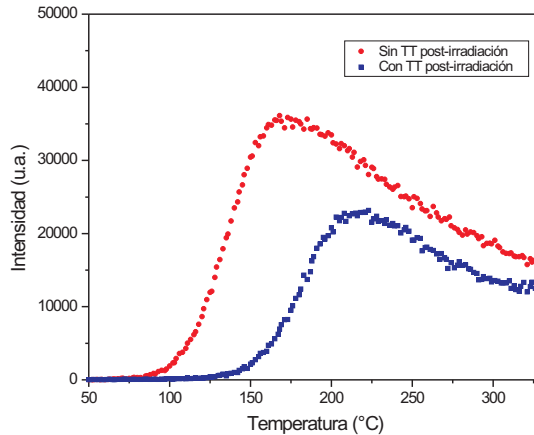


Figura 4: espectro TL para una muestra de la playa de Coveñas irradiada a una dosis de 50 cGy y sometida a un tratamiento térmico post-irradiación de 100°C por diez minutos

Tal comportamiento se explica fácilmente utilizando un modelo fenomenológico [16], según el cual, un alto número de trampas cercanas a la banda de conducción son las primeras en ser desocupadas, las cuales generan los fotones responsables de la parte del espectro de baja temperatura, con lo que se puede inferir que después del tratamiento térmico sólo “sobreviven” los electrones atrapados en trampas de mayor profundidad energética.

3.4 Reproducibilidad

Para estudiar la reproducibilidad de la respuesta TL, un lote de muestras fue sometido a una única irradiación de 100 cGy y dividido al azar en grupos de cinco elementos para su análisis. Los puntos de la figura 5, son los valores medios obtenidos de cada grupo, los cuales se han normalizado al valor medio de las medias de cada grupo; dichos puntos han sido flanqueados por dos líneas que delimitan una franja de anchura de 10 % alrededor de este valor. Las barras de error que se presentan en la figura corresponden a una desviación típica sobre el valor de normalización de cada grupo.

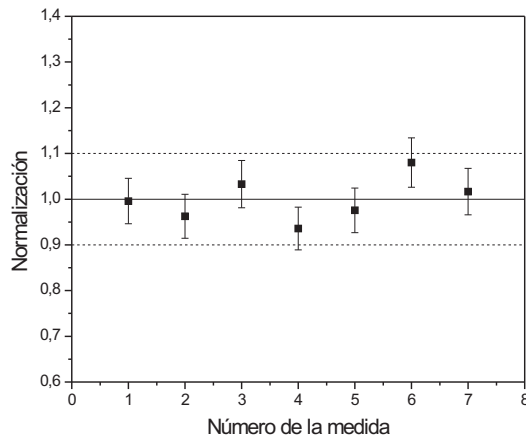


Figura 5: reproducibilidad de la respuesta para un grupo de muestras irradiadas a la misma dosis

De los datos experimentales se concluyó que la incertidumbre asociada con respecto al valor medio de las mediciones tiene un valor del 4,8 %, mientras que las barras de error de estas medidas presentaron una incertidumbre del 5,5 %, lo cual proporciona una incertidumbre combinada de 7,3 %.

Otros autores han encontrado en muestras de arena una incertidumbre en sus medidas de hasta 7,4 % [13], cuando el material es irradiado con rayos gamma, aunque sus lecturas se realizaron usando la técnica de EPR. Los

resultados antes descritos pueden considerarse buenos si se toma en cuenta que dosímetros comerciales, con los cuales se usó la misma metodología, arrojaron una incertidumbre del 6 % [18].

3.5 Respuesta con la dosis

Las muestras de arena, provenientes de la playa de Coveñas, tratadas térmicamente a $400^{\circ}\text{C}/1\text{h}$ fueron irradiadas a diferentes dosis desde 0,5 hasta 10 Gy para estudiar la respuesta del material con la dosis; para lo cual se tomaron siete medidas por cada dosis. Los resultados se observan en la figura 6, en la cual, los puntos representan los valores medios de cada grupo de medidas, obtenidos después de cada irradiación. Las barras de error corresponden a una desviación del 5 % sobre el valor medio de cada grupo de medidas.

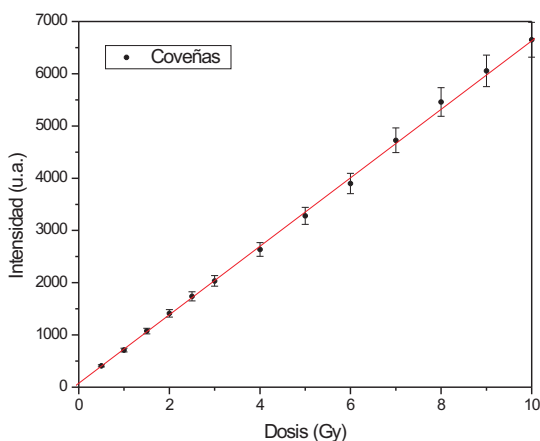


Figura 6: respuesta lineal del material con la dosis desde 0,5 Gy hasta 10 Gy

Los resultados muestran un comportamiento lineal en el rango de dosis empleado, tal como había sido reportado por Vaijapurkar y Bhatnagar [10] para un rango de dosis similar. En un trabajo posterior, Vaijapurkar et alii [11] encontraron que este comportamiento puede llegar a dosis cercanas a los 0,6 kGy, seguido por un comportamiento sublineal para dosis superiores.

En la figura 6 se observa el ajuste lineal realizado, para el cual se obtuvo un coeficiente de correlación R de 0,99964.

3.6 Decaimiento de la señal

Para estudiar el debilitamiento térmico de la señal TL, un grupo de muestras, sometidas al tratamiento térmico establecido, fueron expuestas a una dosis de radiación gamma de 50 cGy. Las medidas fueron realizadas durante los 30 días siguientes a la irradiación, tiempo en el cual, las muestras fueron almacenadas en condiciones ambientales (alta humedad relativa y temperatura promedio de $32^{\circ}\text{C}\pm 4^{\circ}\text{C}$).

Los puntos de la figura 7 representan los valores medios de grupo obtenidos después de cada serie de lectura. Se han representado los datos normalizados al valor medio de la primera serie de lecturas. Por claridad en ambas gráficas se ha mostrado una línea que da cuenta del descenso en la lectura.

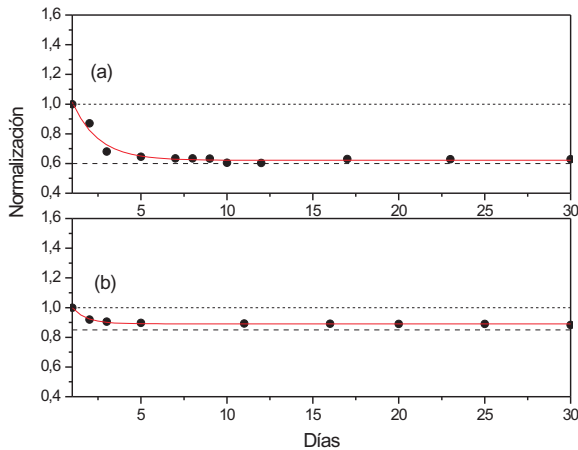


Figura 7: (a) decaimiento de la señal en la muestra de Coveñas sin tratamiento térmico post-irradiación y (b) con un tratamiento térmico post-irradiación

Después de cinco días, las muestras de arena presentaron un decaimiento en la señal del 36 % aproximadamente, con tendencia a un valor constante du-

rante los siguientes 30 días, tal como se observa en la figura 7(a). Resultados encontrados por otros investigadores en materiales similares no muestran un decaimiento significativo durante el mismo período de tiempo [10, 11]. Esta discrepancia en los resultados puede estar relacionada con factores como la alta humedad relativa ($\sim 70\%$) y alta temperatura ambiente ($\sim 32^\circ\text{C}$) presentes en el sitio de almacenamiento durante todo el período de lectura, ya que resultados similares [18] se observaron en dosímetros comerciales TLD-100, para los cuales, el desvanecimiento en la respuesta TL varía aproximadamente del 5–10 % anual [6]. Para minimizar el decaimiento de la señal, las muestras fueron sometidas a un tratamiento térmico de 100°C por 10 minutos, después de recibir una dosis de 50 cGy, tal como fue sugerido por Vaijapurkar [11]. Las muestras, divididas en grupos de siete elementos, se leyeron durante los 30 días siguientes a la irradiación. Los resultados muestran un decaimiento de la señal alrededor del 10 % durante las primeras 48 horas siguientes al proceso de irradiación, con tendencia a un valor constante durante los siguientes 30 días, tal como se observa en la figura 7(b).

3.7 Reutilización

Para verificar si las muestras de arena pueden ser reutilizadas, y con el objeto de eliminar la señal originada por la radiación ionizante, éstas fueron sometidas a diferentes tratamientos térmicos (400°C por 1 h, 400°C por 3 h, 500°C por 1 h, 500°C por 2 h, 650°C por 1 h, 650°C por 2 h, 650°C por 3 h y 800°C por 1 h). Aunque la señal no pudo ser eliminada por completo, se observó una disminución notable de la intensidad del espectro con el aumento de la temperatura y el tiempo del calentamiento. Finalmente se escogió un tratamiento térmico de 400°C durante una hora, ya que sucesivos tratamientos térmicos pueden perjudicar la reproducibilidad y sensibilidad del material, sobre todo cuando se realizan a alta temperatura y por largos períodos de tiempo.

3.8 Límite de detección

La mínima dosis detectada por las muestras de arena fue de 0,02 Gy, después de ser sometidas a radiación gamma. En todos los casos las muestras exhi-

bieron una curva de brillo similar a la que se observó con las otras dosis. Las medidas en este rango presentaron una incertidumbre del 4,5 %.

4 Conclusiones

La arena de la playa de Coveñas exhibe una curva de brillo amplia con un valor máximo localizado aproximadamente a 145°C, el cual, muestra un notorio aumento en la intensidad de la señal con la dosis. Estas curvas pueden consistir en una superposición de dos o más señales TL, las cuales podrían obtenerse por técnicas de deconvolución computacional [16, 17].

La respuesta TL de las muestras de arena con la dosis muestra un comportamiento lineal desde los 0,5 Gy hasta los 10 Gy, tal como había sido reportado en la literatura [10] para un rango de dosis similar. Este comportamiento puede llegar a dosis cercanas a los 0,6 kGy [11], seguido por un comportamiento sublineal para dosis superiores.

Para minimizar el decaimiento de la señal, las muestras fueron sometidas a un tratamiento térmico de 100°C por 10 minutos. Los resultados muestran una notoria reducción en el decaimiento de la señal por lo que podría considerarse la posibilidad de utilizar otros tratamientos térmicos para minimizar este efecto.

Finalmente, los resultados permiten concluir que las muestras de arena estudiadas pueden ser usadas como dosímetros termoluminiscentes en rango de dosis terapéuticos. Las ventajas de este tipo de material son: bajo costo, fácil manejo y el hecho de que la arena es una sustancia natural disponible en grandes cantidades en estas playas.

Agradecimientos

A todo el personal del Centro de Cancerología de la Sabana en Montería-Córdoba, por el préstamo de sus equipos, sin los cuales hubiese sido imposible la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] W. L. McLaughlin, A. W. Boyd, K. H. Chadwick, J. C. McDonal and A. Miller. *Dosimetry for Radiation Processing*, ISBN 0850667402. Taylor & Francis, Londres, 1989. Referenciado en 76
- [2] F. Daniels, C. Boyd and D. Saunders. *Thermoluminescence as a Research Tool*. Science, ISSN 0036–8075, **117**(3040), 343–349 (1953). Referenciado en 77
- [3] Y. S. Horowitz. *Thermoluminescence and thermoluminescent dosimetry*, ISBN 0849356660. CRC Press, Boca Raton, 1984. Referenciado en 77
- [4] S. W. S. Mckeever and R. Chen. *Luminescence Models*. Radiation Measurements, ISSN 1350–4487, **27**(5–6), 625–661 (1997). Referenciado en 77
- [5] S. W. S. Makever, M. Moscovitch and P. D. Townsend. *Thermoluminescence Dosimetry Materials: properties and uses*, ISBN 1870965191. Nuclear Technology Publishing, Ashford, 1995. Referenciado en 77
- [6] V. Kortov. *Materials for thermoluminescent dosimetry: Current status and future trends*. Radiation Measurements, ISSN 1350–4487, **42**(4–5), 576–581 (2007). Referenciado en 77, 87
- [7] Pradeep Narayan, K. R. Senwar, S. G. Vaijapurkar, D. Kumar and P. K. Bhatnagar. *Application of commercial glasses for high dose measurement using the thermoluminescent technique*. Applied Radiation and Isotopes, ISSN 0969–8043, **66**(1), 86–89 (2008). Referenciado en 77
- [8] M. I. Teixeira, G. M. Ferraz and L. V. E. Caldas. *EPR dosimetry using commercial glasses for high gamma doses*. Applied Radiation and Isotopes, ISSN 0969–8043, **62**(2), 365–370 (2005). Referenciado en 77
- [9] A. A. Jr. Rodrigues and L. V. E. Caldas. *Commercial plate window glass tested as routine dosimeter at a gamma irradiation facility*. Radiation Physics and Chemistry, ISSN 0969–806X, **63**(3), 765–767 (2002). Referenciado en 77
- [10] S. G. Vaijapurkar and P. K. Bhatnagar. *Low cost thermoluminescence (TL) gamma dosimeter for radio-therapy*. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, ISSN 0735–245X, **21**(2), 267–269 (1993). Referenciado en 77, 79, 80, 85, 87, 88
- [11] S. G. Vaijapurkar, R. Raman and P. K. Bhatnagar. *Sand a high gamma dose thermoluminescence dosimeter*. Radiation Measurements, ISSN 1350–4487, **29**(2), 223–226 (1998). Referenciado en 77, 85, 87, 88

- [12] S. Chawla, T. K. Gundu Rao, Y. Singhvi A. K. *Quartz thermoluminescence dose and dose-rate effects and their implications*. Radiation Measurements, ISSN 1350-4487, **29**(1), 53-63 (1998). Referenciado en 77
- [13] M. I. Teixeira, G. M. Ferraz, L. V. E. Caldas. *Sand for high-dose dosimetry using the EPR technique*. Applied Radiation and Isotopes, ISSN 0969-8043, **62**(2), 359-363 (2005). Referenciado en 77, 78, 79, 84
- [14] M. I. Teixeira and L. V. E. Caldas. *Sintered sand pellets for high-dose dosimetry*. Nuclear instruments & methods in physics research. Section B, Beam interactions with materials and atoms, ISSN 0168-583X, **218**, 194-197 (2004). Referenciado en 77, 78
- [15] José Luis Muñiz Gutiérrez. *Métodos experimentales de dosimetría postal para el control de calidad en radioterapia basados en LiF:Mg,Ti (TLD-100) y LiF:Mg,Cu,P (GR-200): Aplicación de métodos numéricos al análisis de las curvas de termoluminiscencia*. Madrid, 1999, 203 h. Tesis Doctoral (Doctor en Ciencias Física). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Física de Materiales. Referenciado en 79, 82, 83
- [16] Edinson Humberto Osorio López. *Estudio de la termoluminiscencia en el vitrocerámico LAS:CeO₂*. Medellín, 2008, 54 h. Tesis de Maestría (Magíster en Ciencias Química). Universidad de Antioquia, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Instituto de Química. Referenciado en 83, 88
- [17] Omar Darío Gutiérrez Flórez. *Síntesis y caracterización de materiales vitrocerámicos con propiedades de luminiscencia*. Medellín, 2006, 122 h. Tesis de Maestría (Magíster en Ciencias Química). Universidad Nacional de Colombia-Medellín, Facultad de Ciencias, Escuela de Química. Referenciado en 83, 88
- [18] Jorge Isaacs Herrera Cuitiva. 2008. *Estudio de las principales características dosimétricas del TLD - 100*. Montería, 2008, 90 h. Trabajo de grado (Físico). Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias e Ingenierías, Departamento de Física. Referenciado en 85, 87