

Caracterización física de una gammacámara de píxel discreto

Physical characterization of a discrete pixel gamma camera

Pablo Saldaña Gutiérrez^{1*}, Rafael Puchal Añé²

¹ Servicio de Física Médica y Protección Radiológica, Institut Català d'Oncologia, L'Hospitalet de Llobregat (Barcelona).

² Servicio de Medicina Nuclear, Hospital Universitari de Bellvitge - IDIBELL, L'Hospitalet de Llobregat (Barcelona).

Fecha de Recepción: 10/02/2012 - Fecha de Aceptación: 10/07/2012

El desarrollo de nuevos materiales semiconductores durante los últimos veinte años ha llevado a la aparición de compuestos como el CdTe (Teluro de Cadmio) o el CZT (Teluro de Cadmio-Zinc), que tienen aplicación en detectores de rayos γ en medicina nuclear. Estos nuevos semiconductores tienen entre otras propiedades que los hacen interesantes la excelente resolución espacial y en energía, el funcionamiento a temperatura ambiente y una alta eficiencia. El objetivo de este trabajo es la caracterización física de la gammacámara portátil MINICAM 2 (EURORAD), cuyos elementos detectores están basados en tecnología de CdTe, sometiendo a algunas de las pruebas de las normas NEMA. Se estudió la resolución espacial y en energía, la uniformidad y la sensibilidad, usando diferentes radioisótopos. Los resultados que se obtuvieron muestran una superior resolución espacial y en energía de la cámara estudiada frente a los cristales centelleadores de NaI(Tl), mientras que el rendimiento fue similar en las pruebas de uniformidad y sensibilidad.

Palabras clave: gammacámara portátil, CdTe, detectores de estado sólido, control de calidad.

The development of new semiconductor materials for the last twenty years has led to the appearance of compounds such as CdTe (Cadmium Telluride) or CZT (Cadmium-Zinc Telluride), which have application in γ -ray detectors in nuclear medicine. These new semiconductors have, among other properties that make them interesting, an excellent spatial and energy resolution, can operate at room temperature and high efficiency. The aim of this work is the physical characterization of the CdTe based MINICAM 2 (EURORAD) portable semiconductor gamma camera, subjecting it to some of the NEMA standard tests. We studied the spatial and energy resolution, uniformity and sensitivity, using different radioisotopes. The obtained results showed a higher spatial and energy resolution of the camera compared to the NaI(Tl) scintillator crystals, while the performances were similar in uniformity and sensitivity tests.

Key words: hand-held gamma camera, CdTe, solid-state detector, quality control.

Introducción

Hace ya más de veinte años que existe un gran interés en el desarrollo de nuevos materiales semiconductores para aplicaciones médicas¹. Una de las aplicaciones más interesantes y de más rápido desarrollo se encuentra en el campo de los detectores de rayos γ para aplicaciones en medicina nuclear. Este rápido desarrollo ha venido motivado por el hecho de que las cámaras Anger han alcanzado un compromiso óptimo entre sensibilidad, resolución espacial y capacidad de tasa de cuentas (cps). Por este motivo se proponen nuevos detectores basados en materiales semiconductores que convierten directamente la energía del fotón γ en una señal eléctrica

ca, con rendimientos hasta 20 veces superiores² respecto al sistema fotomultiplicador cristal de NaI.

Entre los materiales semiconductores que se han propuesto, los compuestos por CdTe (Teluro de Cadmio) o CZT (Teluro de Cadmio-Zinc), son los que mayor popularidad están ganando para formar la base de estos nuevos detectores de rayos γ . Las propiedades más interesantes³ de estos materiales son:

Resolución en energía: Se encuentra en el rango de 3.6 a 5% (para los 140 keV del fotopico del ^{99m}Tc) y es de 3 a 4 veces superior a un detector de centelleo. Esto permite una mejor discriminación de los fotones Compton, lo que aumenta el contraste de la imagen y la relación señal ruido.

* Correspondencia
Email: derwyd@gmail.com

Resolución espacial: Los fotones sufren dispersión en los cristales de NaI(Tl), generando incertidumbres a la hora de localizar el lugar de la interacción primaria. En el caso de los detectores de semiconductor la resolución espacial intrínseca viene dada por el tamaño del cristal semiconductor, que a su vez determina el tamaño de píxel.

Tasa de cuentas: Una gammacámara convencional es un contador paralizable que incluso en sus desarrollos más modernos se encuentra limitada por el largo tiempo de relajación de la luz emitida en el cristal de NaI(Tl). En un detector de semiconductor la tasa de cuentas puede ser de 3 a 4 veces superior³, dependiendo de la electrónica asociada.

Temperatura de funcionamiento: Al contrario que otros materiales semiconductores como el Ge(Li), los compuestos de CdTe funcionan y se pueden almacenar a temperatura ambiente, lo que evita la necesidad de usar un criostato.

Voltaje: No se necesita una polarización elevada para recoger una buena señal. Rango de 10 a 100 V/mm.

Alta eficiencia: Un espesor de 5 mm de CdTe tiene una eficiencia fotoeléctrica comparable a la de un espesor de 9.5 mm de NaI(Tl), que es el espesor del cristal centelleador de una gammacámara planar típica. Los valores son de un 81% para el CdTe⁴ y del 80% para el NaI(Tl)⁵.

Escalabilidad: Grandes cantidades de estos detectores se pueden agrupar en matrices, junto con la electrónica asociada, permitiendo diseños ligeros y compactos.

Este tipo de detectores, basados en semiconductores tipo CdTe o CZT, permiten el desarrollo de gammacámaras basadas en matrices de píxeles discretos, ligeras y compactas, útiles para ser usadas, por ejemplo, en unidades de cuidados intensivos para exploraciones cardiacas o en otro tipo de aplicaciones clínicas ambulatorias.

Hoy en día existe una variada oferta de cámaras de píxeles de este tipo, entre los modelos comerciales y los prototipos desarrollados en centros de investigación^{2,3,6-8*} así como diseños de cámaras de píxel discreto basadas en cristales centelleadores⁹. Si bien es cierto que casi todos estos modelos son cámaras portátiles, es de esperar que según se vayan refinando la tecnología y los procesos de producción de los elementos semiconductores, las casas comerciales empiecen a producir modelos con campos de visión grandes^{**}.

El presente trabajo tiene como objetivo la caracterización física de la gammacámara portátil MINICAM 2 fabricada por EURORAD (véase la fig. 1), mediante la realización de algunas de las pruebas recomendadas en las normas de la *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA)¹⁰ americana para gammacámaras de píxeles.

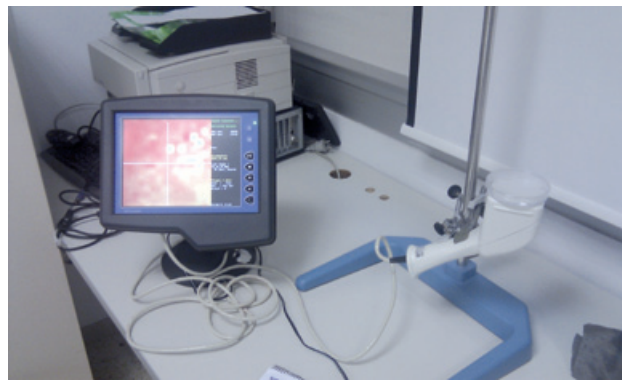


Fig. 1. MINICAM 2 (EURORAD) mostrando en pantalla uno de los mapas de uniformidad.

Material y métodos

Descripción general de la cámara

El sistema está integrado por una cabeza detectora basada en la tecnología de CdTe y un módulo electrónico que controla la cámara y permite visualizar las imágenes.

El módulo incluye una pantalla de cristal líquido tipo *thin film transistor* (TFT) de 10.4" y 256 colores, la electrónica de procesamiento de las señales, una fuente de alimentación de 12 V, botones de control del detector y una ranura para una tarjeta de memoria tipo *multi media card* (MMC) de 64 Mb, donde se almacenan las imágenes que toma la cámara en formato *bitmap* (BMP) y los espectros en un archivo hexadecimal.

La cámara está formada por 256 detectores individuales de CdTe, de un tamaño cada uno de ellos de 2.46 mm x 2.46 mm x 5 mm, y que están montados sobre una matriz de 16x16. A partir de la matriz de 16x16 cristales el equipo proporciona imágenes de 120x120 píxeles por interpolación. La cabeza detectora está equipada de un colimador de tántalo de 24 mm de grosor, agujeros de 6 mm² y septa de 0.3 mm. El área efectiva de detección es de 40 mm x 40 mm. El módulo y la cámara están unidos por un cable de 3.5 m de largo.

La cámara está preparada para trabajar en un rango de energías de 30 a 200 keV con una resolución espacial teórica de 2.46 mm a 1 cm y resolución en energía del 5 al 8% para el ⁵⁷Co y del 5 al 7% para el ^{99m}Tc.

Pruebas físicas

Todas las pruebas físicas estáticas que se le realizaron a la cámara portátil siguieron las normas NEMA¹⁰. El colimador se encuentra insertado dentro de la cabeza del detector y no hay posibilidad de quitarlo, por lo que todas las pruebas que se realizaron han sido extrínsecas.

* Enlace a los folletos comerciales de dos modelos fabricados por EURORAD: http://www.eurorad.com/PDF/BR_minicam_1.pdf y http://www.eurorad.com/PDF/BR_MinicamII.pdf.

** La casa comercial DIGIRAD ya dispone de un modelo de estas características en el mercado: http://www.digirad.com/downloads_2007/Ergo_website.pdf

Resolución en energía

Los espectros de energía se obtuvieron colocando sobre la cara activa del detector una placa de Petri de 85 mm de diámetro que contenía una disolución del radioisótopo que queríamos estudiar. De esta forma se obtuvo una fuente extensa que irradiaba de forma homogénea cada uno de los elementos detectores individuales. Este procedimiento se siguió para medir los espectros del ^{67}Ga , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ y ^{123}I , usando una actividad de 18.5 MBq, mientras que para el ^{57}Co se utilizó una fuente puntual de 3 MBq situada a 10 cm de la cara activa de la cámara. Al menos 10000 cuentas se han adquirido en el canal del máximo.

Para cada uno de los 256 espectros asociados a los detectores individuales se midió la anchura completa a mitad del máximo del fotopico (ACMA). A continuación se obtuvo el valor medio de éstas y se expresó la resolución como un tanto por ciento relativo a la energía considerada para su determinación.

El ^{67}Ga y el ^{57}Co tienen más de un fotopico cada uno en su espectro (cinco el galio y dos el cobalto¹¹) y se decidió que se analizaría aquel correspondiente a la desintegración de mayor factor de abundancia, ya que este aparece con mayor claridad en el espectro.

Por otro lado, a partir de la posición del fotopico en cada uno de los espectros de los diferentes radioisótopos, y conocida la energía de cada uno de ellos, se estudió la linealidad de la respuesta en energía de la cámara

Uniformidad

La uniformidad se midió usando una fuente extensa de 18.5 MBq de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, 16.7 MBq de ^{67}Ga y 21.9 MBq de ^{123}I , colocados en una placa de Petri sobre la cara activa de la cámara (véase la fig. 1), y se parametrizó mediante el coeficiente de uniformidad integral. Se recogieron 4 millones de cuentas para cada isótopo.

La MINICAM 2 no permite ajustar una ventana de energía de nuestra elección. Las especificaciones del fabricante no dicen si la cámara tiene o no una ventana predefinida (en el rango de 30 a 200 keV en el que se recomienda trabajar), y simplemente recomiendan trabajar en ese rango de energías.

El colimador está fabricado con tántalo, cuya densidad de $16.69 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ lo hace altamente eficaz para absorber la mayor parte de los fotones dispersos producidos en la fuente radiactiva por interacción Compton, de forma que se mejora sustancialmente la calidad de la imagen.

Resolución espacial

Las medidas realizadas para calcular la resolución espacial se realizaron usando el montaje experimental que se puede ver en la figura 2. Se disponía de un

tubo capilar de diámetro inferior a 1 mm lleno de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ con una actividad de 18.5 MBq, fijado a un armazón que se podía deslizar sobre una base de metacrilato. Para controlar los desplazamientos se fijó una regla al armazón de metacrilato. Siguiendo las normas NEMA¹⁰, las medidas se realizaron moviendo el tubo capilar en incrementos de 1 mm y tomando una imagen en cada posición, realizando este proceso tanto en el eje x como en el eje y. Se recogieron 10 medidas en cada dirección, para las distancias fuente-detector de 1 y 10 cm.

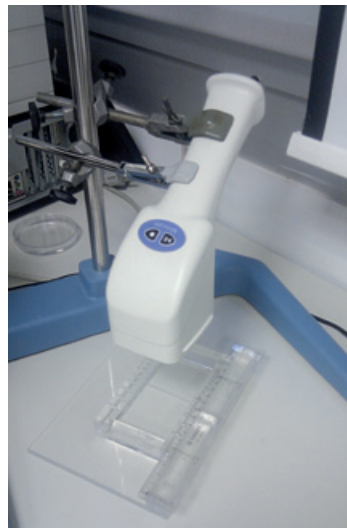


Fig. 2. Montaje experimental para el estudio de la resolución espacial.

La resolución espacial se expresó como la media de las ACMA medidas en cada una de las imágenes obtenidas.

Sensibilidad

La sensibilidad planar de un sistema se define como la razón entre el número de cuentas detectadas en un plano de adquisición y la actividad de una fuente plana paralela a ese plano¹⁰.

Esta prueba se ha de realizar para cada isótopo con el que se vaya a usar la cámara y para cada tipo de colimador. En nuestro caso se midió para $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{67}Ga y ^{123}I . La ventana de aceptación de energía no se puede ajustar en esta cámara, por lo que los fotones de todos los canales de desintegración contribuyeron a las medidas de sensibilidad.

El material necesario para realizar las medidas consistía de una placa de Petri de 85 mm de diámetro que cubría completamente la cara activa de la cámara, llena de una disolución de agua y el radioisótopo, de forma que se cubrió uniformemente el fondo, con una profundidad de unos 2 a 3 mm. Se usaron 20.7 MBq de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, 21.9 MBq de ^{123}I y 16.7 MBq de ^{67}Ga .

La placa de Petri se colocó a 100 mm de la cara del detector y se recogieron al menos 4 millones de cuentas.

Software de procesado

Los datos e imágenes recogidos mediante la MINICAM 2 se procesaron usando varios programas escritos por los autores en MATLAB (Mathworks, Inc).

Resultados y discusión

Resolución en energía

Los resultados obtenidos al analizar los diferentes espectros se presentan en la tabla 1. Se observó la superior resolución en energía que presenta esta cámara debido al uso de detectores de semiconductor frente a la típica resolución de los detectores de NaI(Tl), que suele estar en el rango del 8 al 10% para ^{99m}Tc ¹⁰. Además, en el caso del ^{99m}Tc y el ^{57}Co , al disponer de las especificaciones dadas por el fabricante se comprobó que nuestros resultados estaban dentro de tales especificaciones.

Tabla 1. Resolución en energía de la MINICAM 2 para cada uno de los isótopos utilizados.

Resolución en energía				
Isótopo	Energía (keV)	Resolución Media (%)	Coef. Variación (%)	Valor Fabricante
^{67}Ga	93	5.31 ± 1.06	19.8	-
^{99m}Tc	141	4.09 ± 0.55	11.1	5-7%
^{123}I	159	5.39 ± 0.58	10.8	-
^{57}Co	122	5.97 ± 0.66	11.0	5-8%

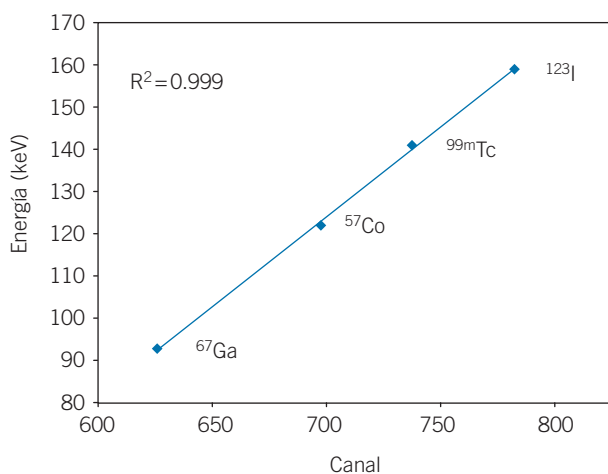


Fig. 3. Linealidad de la respuesta en energía de la MINICAM 2.

Por otro lado, se analizó la linealidad de la respuesta del detector respecto a la energía de los fotones incidentes. En esta medida se utilizaron los mismos isótopos que en la determinación de la resolución en energía. Para cada uno de los isótopos se escogió el canal donde se encuentra el máximo valor del fotopico, y se representó frente a la energía tabulada correspondiente. La gráfica obtenida (véase la fig. 3) muestra el ajuste lineal, con coeficiente de determinación calculado de 0.999. Podemos decir entonces que la cámara tiene una excelente respuesta lineal en energía.

Uniformidad

A las imágenes de uniformidad obtenidas se les aplicó la máscara de suavizado recomendada por las normas NEMA¹⁰:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

obteniéndose un valor de uniformidad de 5.9% para el ^{99m}Tc y de 3.2% para el ^{123}I . Los resultados que se obtuvieron para el ^{67}Ga con un número de cuentas similar al de los otros isótopos (4 millones) mostraron lo que parecían ser problemas de saturación de la cámara (valores de uniformidad del 0%). Para buscar los límites de la saturación se decidió hacer un estudio de la uniformidad reduciendo progresivamente el tiempo de medida, de forma que el número de cuentas registradas disminuyese. Los resultados que se obtuvieron se muestran en la figura 4. Se observó que para valores de entre 4000 y 6000 cuentas por píxel la uniformidad baja rápidamente. Como se puede ver en la tabla 2, el ^{67}Ga presenta cinco canales de desintegración, dos de los cuales, los de 300 y 390 keV¹¹, están situados fuera del rango de energías del equipo (30-200 keV). La contribución de estos fotones a la respuesta del detector no es despreciable ya que entre ambos tienen un factor de abundancia de 0.29. Como comparación se realizó el mismo estudio con el ^{99m}Tc , representándose los resultados en la figura 5. La gráfica de la uniformidad frente al número de cuentas del tecnecio sigue una curva suavemente decreciente que es el comportamiento habitual y esperable de este parámetro en las gammacámaras planares convencionales.

Tabla 2. Canales de desintegración gamma y factores de abundancia del ^{67}Ga ¹¹.

Energía (keV)	92	182	206	300	390
Factor de abundancia	0.42	0.24	0.025	0.22	0.07

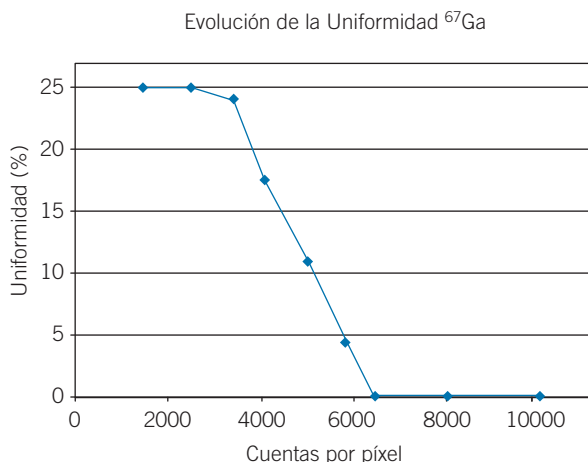


Fig. 4. Evolución de la uniformidad del ⁶⁷Ga en función del número de cuentas registradas.

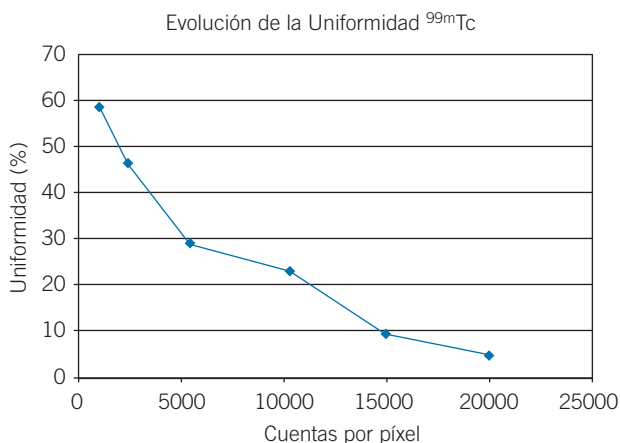


Fig. 5. Evolución de la uniformidad del ^{99m}Tc en función del número de cuentas registradas.

Debido al comportamiento anómalo de la uniformidad observado para el ⁶⁷Ga, que podría entenderse si la cámara no usase una ventana de aceptación de impulsos, se procedió a comprobar si dicha ventana existía.

Para comprobar si el detector presenta una ventana fija de discriminación en energía, se empleó una fuente de ¹³¹I, que emite fotones de 360 keV. Con un número de cuentas equivalente a las registradas para el ^{99m}Tc (140 keV), para la misma actividad, se observó el mismo efecto que para el ⁶⁷Ga, quedando patente

que la cámara no presenta una ventana fija de discriminación en energía y no se puede emplear con isótopos que presenten un espectro con fotones de energía superior a 200 keV. Es probable que la interacción de estos fotones con los cristales detectores contribuya a saturar la electrónica debido a que ésta no está preparada para discriminarlos. Además, se tendrá un fondo de fotones Compton generados por estos fotones primarios de alta de energía tanto en la fuente radiactiva como en el colimador y los cristales detectores, cuyo efecto conjunto será degradar la respuesta de la cámara.

Es preciso comentar, que el equipo permite hacer mapas de corrección de uniformidad. Los valores de uniformidad que indicaban estos mapas dieron en todos los casos valores por debajo del 1%, independientemente del número de cuentas recogidas, valores bien diferentes a los que se calcularon mediante nuestros programas. No se puede dejar de enfatizar la importancia de tener unas herramientas de control de calidad que sean independientes de las que proporcionan las casas comerciales.

Resolución espacial

Los resultados obtenidos al analizar las imágenes de resolución espacial (véase la fig. 6) se resumen en la tabla 3. En ella se encuentran los valores de la resolución espacial medidos para las dos distancias fuente-detector, y para las dos direcciones ortogonales.

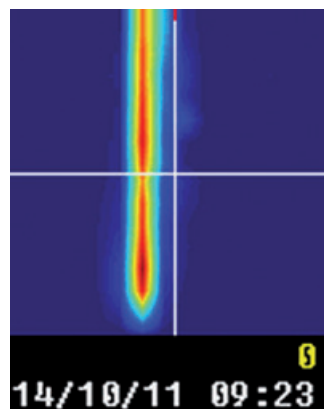


Fig. 6. Imagen de la fuente lineal usada para la medida de la resolución espacial.

Tabla 3. Resolución espacial para las dos distancias recomendadas en las normas NEMA y en las dos direcciones ortogonales.

Resolución espacial	d = 1 cm			d = 10 cm		
	Eje X	Eje Y	Diferencia	Eje X	Eje Y	Diferencia
Resolución media (píxel)	10.21±0.19	10.20±0.11	0.10%	14.80±0.84	15.48±0.84	4.40%
Resolución media (mm)	3.40±0.06	3.40±0.04		4.93±0.28	5.16±0.21	

Los resultados muestran la superioridad que tiene la MINICAM 2 para discriminar puntos que estén muy cerca unos de otros, con una resolución que es hasta el doble de la que tienen los sistemas basados en NaI(Tl), cuya resolución típica para el ^{99m}Tc se encuentra en el rango de los 8 a 14 mm con colimador de baja energía¹².

Como ya se indicó en la descripción general de la cámara, las imágenes que se generan son de 120 píxeles x 120 píxeles, y teniendo en cuenta que el campo de visión de la cámara es de 40 mm en cada dirección, se obtiene un tamaño de píxel de 0.33 mm.

Los valores que se obtuvieron de resolución espacial a 1 cm fueron de 3.40 mm en ambas direcciones, valor ligeramente peor que el teórico de 2.46 mm. Esta diferencia se puede explicar ya que el valor teórico solo se obtendría si colocásemos la fuente justo sobre los cristales detectores, pero la realidad es que la matriz de detectores está detrás de un colimador de 24 mm y dentro de un cabezal de plástico. Por lo tanto, tiene sentido obtener un valor de resolución espacial peor que el teórico.

Sensibilidad

Los valores obtenidos de la sensibilidad planar del sistema han sido 100 cps/MBq para el ^{99m}Tc y 110 cps/MBq para el ^{123}I . A la vista del comportamiento anómalo de la cámara en el estudio de la uniformidad para el ^{67}Ga se decidió descartar los resultados de la prueba de sensibilidad para este isótopo.

Comparando los resultados con los valores estándar¹², se observó que se habían obtenido valores comparables a las de una gammacámara de NaI(Tl) con colimador de baja energía y propósito general, cuyos valores típicos son del orden de 100 a 150 cps/MBq para el ^{99m}Tc . Se hace patente otra de las ventajas de los materiales semiconductores. El mayor número atómico del compuesto CdTe permite obtener buenas sensibilidades usando grosores menores de los elementos detectores.

Conclusiones

La MINICAM 2 de EURORAD es un buen ejemplo de las bondades de las cámaras de píxel discreto basadas en detectores de semiconductor. Por un lado, hemos visto que todas las pruebas recomendadas en

las normas NEMA¹⁰ que hemos realizado son aplicables a este modelo, y por el otro, se ha puesto de manifiesto la excelente resolución espacial y en energía que esta cámara posee, así como sus limitaciones para energías superiores a 200 keV.

Bibliografía

1. Scheiber Ch, Giakos GC. Medical applications of CdTe and CdZnTe detectors. Nucl Inst and Meth A 2001;458:12-25.
2. Chambron J, Arntz Y, Eclancher B, Scheiber C, Siffert P, Hage-Hali M, et al. A pixelated γ -camera based on CdTe detectors; clinical interests and performances. Nucl Inst and Meth A 2000;448:537-49.
3. Scheiber Ch, Eclancher B, Chambron J, Prat V, Kazandjan A, Jahnke A, et al. Heart imaging by cadmium telluride gamma camera, European Program "BIOMED" consortium. Nucl Inst and Meth A 1999;428:138-49.
4. Del Sordo S, Abbene L, Caroli E, Mancini A, Zappettini A, Ubertini P. Progress in the development of CdTe and CdZnTe semiconductor radiation detectors for astrophysical and medical applications. Sensors 2009;9:3491-526.
5. Hine G, editor. Instrumentation in Nuclear Medicine. New York: Academic Press;1967. p. 506.
6. Zumbiehl A, Sowinska M, Friedrich M, Kazandjian A, Scheiber Ch. Comparison between three gamma cameras based on cadmium telluride and cadmium telluride detector arrays. Nuclear Science Symposium Conference Record; 2001 Oct. 19-25; Portland, Estados Unidos. IEEE Conference Publications 2003;3:1972-5.
7. Arntz Y, Chambron J, Dumitresco B, Eclancher B, Prat V. A portable cadmium telluride multidetector probe for cardiac function and monitoring. Nucl Inst and Meth A 1999; 428:150-7.
8. Griesmer J, Kline B, Grosholz J, Parnham K, Gagnon D. Performance Evaluation of a new CZT detector for nuclear medicine: SOLSTICE. Nuclear Science Symposium Conference Record; 2001 Nov. 4-10; San Diego, Estados Unidos. IEEE Conference Publications 2001;2:1050-4.
9. Pitre S, Ménard L, Ricard M, Solal M, Garbay J, Charon Y. A hand-held probe for radio-guided surgery: physical performance and preliminary clinical experience. Eur J Nucl Med 2003;30:339-43.
10. National Electrical Manufacturers Association. Performance Measurements of Gamma Cameras. NEMA Standards Publications NU1-2007. Washington (DC), 2007.
11. Table of Radionuclides. Monographie Bureau International des Poids et Mesures. Vol 1-5. Sevres, 2010.
12. Cherry S, Sorenson J, Phelps M. En: Saunders editor. Physics in Nuclear Medicine. 3 ed. Philadelphia Elsevier; 2003. p. 227-51.