

Estudios Dosimétricos, Espectrométricos, Radiográficos, Metalográficos de una Nueva Semilla Argentina de ^{125}I Empleada en Braquiterapia

Pirchio Rosana, Saraví Margarita, Banchik David y Muñoz Carlos

Comisión Nacional de Energía Atómica

Pbro. J.González y Aragón N°15, (B1802AYA), Ezeiza, Buenos Aires, Argentina

pirchio@cae.cnea.gov.ar; saravi@cae.cnea.gov.ar; banchik@cae.cnea.gov.ar;

cmunoz@cae.cnea.gov.ar

Resumen

Una nueva fuente de ^{125}I modelo BraquibacTM ha sido desarrollada en Argentina para aplicaciones en braquiterapia intersticial. La AAPM Task Group 43 (TG-43) recomienda que características dosimétricas de nuevas fuentes de braquiterapia de Iodo-125 sean determinadas teóricamente y experimentalmente antes de su uso clínico. Los objetivos planteados en este trabajo fueron el estudio del diseño de la nueva semilla, el cálculo de parámetros dosimétricos y el análisis de espectros de fotones. Se realizaron estudios radiográficos y metalográficos para determinar las características físicas de la fuente. Para la realización de los cálculos dosimétricos se utilizó el código Monte Carlo MCNP5. Valores de la función de dosis radial, $g(r)$, de la constante de tasa de dosis, A , de la función de anisotropía de dos dimensiones, $F(r; \theta)$, del factor y constante de anisotropía fueron obtenidos simulando la fuente en agua de acuerdo a la metodología recomendada en TG-43. La constante de tasa de dosis resultó igual a $0,880 \pm 0,080 \text{ cGy h}^{-1} \text{ U}^{-1}$. La tasa de kerma en aire de referencia, S_K , fue calculada como $1,036 \text{ cGy cm}^2 \text{ h}^{-1} \text{ mCi}^{-1}$ simulando la semilla en aire seco. Se realizaron estudios espectrométricos utilizando un detector semiconductor planar de HPGe (germanio hiperpuro). Espectros de fotones mostraron rayos x característicos de ^{125}I con energías de 27,20 keV, 27,47 keV, 31 keV y 31,70 keV, fotones gama de 35,5 keV, y rayos x fluorescente provenientes del núcleo de plata de 22,10 keV, 24,94 keV y 25,45 keV. La dependencia angular de la intensidad de fotones alrededor de la semilla y en aire fue analizada con el detector planar. Esto se realizó para estudiar la anisotropía en el flujo de fotones debida a variación en el espesor de la pared de titanio y de las soldaduras, movimientos del tubo de plata en el interior de la fuente y deposición del material radiactivo sobre el tubo de plata.

1. INTRODUCCIÓN

Fuentes de ^{125}I son ampliamente utilizadas para implantes intersticiales en diferentes sitios anatómicos. La principal razón es que las emisiones de fotones de baja energía interactúan con los tejidos fundamentalmente vía absorción fotoeléctrica, resultando en una mayor dosis absorbida en la lesión y una baja irradiación al tejido normal que la rodea [1]. Una nueva fuente de braquiterapia de ^{125}I modelo BraquibacTM ha sido desarrollada recientemente (Bacon Co.,

Buenos Aires, Argentina) [2]. La AAPM Task Group 43 (TG-43 y TG-43U1) recomienda que características dosimétricas de nuevas fuentes de braquiterapia de Iodo-125 sean determinadas teóricamente y experimentalmente antes de su uso clínico [3,4]. Para la determinación teórica de las características dosimétricas de semilla Braquibac™ fue utilizado el método Monte Carlo, el cual requirió un detallado conocimiento del diseño de la semilla. Estudios radiográficos y metalográficos fueron realizados, y las características físicas de las soldaduras, paredes y marcador de rayos x fueron determinadas. Valores de $g(r)$, A , $F(r, \theta)$, factor y constante de anisotropía fueron obtenidos en agua por simulación utilizando el código Monte Carlo MCNP5. S_K fue calculado simulando la fuente de braquiterapia en aire seco. Se realizaron estudios espectrométricos utilizando un detector planar de HPGe para completar el análisis de las semillas. El espectro de fotones permitió la determinación de la anisotropía de la intensidad de fotones en aire alrededor de la semilla producida principalmente por las puntas y soldaduras. Para el propósito de comparación fueron utilizadas semillas de ^{125}I modelo 6711 (Amersham Health, Princeton, NJ) debido a su amplio uso clínico.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1 Análisis radiográfico

Se realizaron estudios radiográficos para observar la estructura interna de las semillas Braquibac™. Para éste propósito se tomaron radiografías de diez semillas; algunas de ellas fueron sacudidas para visualizar eventuales cambios producidos por un movimiento del núcleo de plata. En el momento de las mediciones, las fuentes tenían un valor de tasa de kerma en aire de referencia igual a 0,127 U ($1\text{U}=1\mu\text{Gy m}^2 \text{h}^{-1}$) o actividad aparente de 0,1 mCi [5] ($1\text{U}=1,27\text{ mCi}$). Un esquema de la semilla es mostrado en la Figura 1. Las fuentes fueron introducidas en un fantoma de acrílico de $30\times 30\times 3\text{ cm}^3$ y radiografías fueron obtenidas con un equipo de rayos x con un voltaje de 38 kV, tiempo de exposición de 0,04 segundos, en una distancia de 100 cm y con tamaño de campo de $23\times 24\text{ cm}^2$. Las longitudes y diámetros de las semillas, así también como las dimensiones de los núcleos de plata, las soldaduras, y las paredes de titanio, fueron determinadas desde las radiografías utilizando programas de procesamiento de imágenes como ImageJ v1.34, Photoshop v7 y AutoCAD v14.

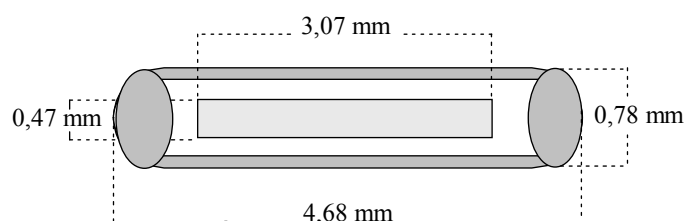


Figura 1: Diseño esquemático de la semilla de iodo-125 modelo Braquibac™ mostrando la pared lateral de titanio, soldaduras de titanio, núcleo de plata y el espacio con aire.

2.2. Análisis Metalográfico

Se realizaron estudios metalográficos de las semillas para analizar el aspecto, forma y dimensiones de las paredes y soldaduras. El procedimiento seguido es un método destructivo que consiste en la introducción dentro de bakelita de cinco semillas inactivas, en posición horizontal, las cuales fueron tratadas con un material abrasivo. Las muestras fueron reducidas en sucesivas etapas y en cada una de ellas se tomaron microfotografías. Las imágenes fueron amplificadas 200 veces para observar los cortes en detalle. Cuando el plano medio transversal de la semilla fue alcanzado, el cual ocurrió en la quinta etapa, el proceso fue detenido. Se analizaron los meniscos, la presencia de fisuras, deformaciones, porosidad, forma y espesor de las soldaduras y paredes.

2.3. Análisis Espectrométrico

Las características espectrales de los fotones de baja energía de la nueva semilla de Iodo-125 fueron determinadas utilizando un detector semiconductor planar de HPGe acoplado a un analizador multicanal. Este detector posee una delgada ventana de berilio con un área activa de 100 mm^2 .

La dependencia de la intensidad de fotones con la orientación de la fuente fue analizada en aire, siguiendo el método propuesto por Wierzbicki para la semilla Amersham [6]. El procedimiento consistió en colocar una semilla dentro de un portafuentes, en el cual se podía leer el ángulo de rotación de la fuente. El sistema detallado anteriormente fue construido en acrílico para minimizar la dispersión.

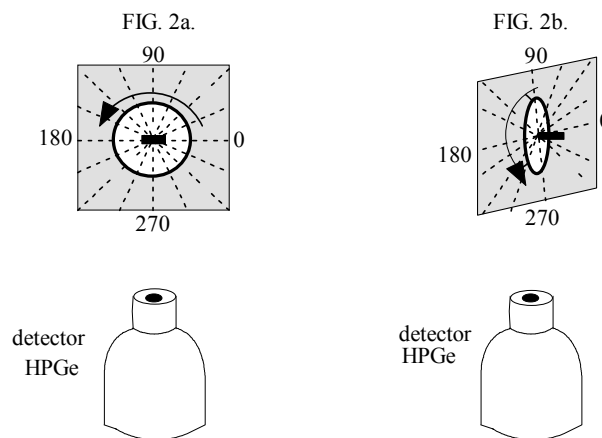


Figura 2: Setup experimental utilizado para mediciones de espectros de fotones emitidos por la semilla Braquibac™ utilizando un detector semiconductor planar de HPGe a) Rotación de la semilla en un eje perpendicular a su eje longitudinal y b) Rotación de la fuente sobre su eje longitudinal.

Diez semillas modelo Braquibac™ y dos semillas modelo 6711 con 0,5 U fueron utilizadas para espectrometría. La distancia desde el detector al centro de la semilla fue fijada en 40 cm.

El primer objetivo de estas series de mediciones fue evaluar la anisotropía de fotones debido a variaciones en el espesor de la pared de titanio, distribución del material radioactivo y movimientos del núcleo de plata. Cada semilla fue rotada sobre su eje longitudinal y espectros de fotones fueron obtenidos en intervalos de 20°. Las intensidades de fotones fueron determinadas para los picos de 22,10 keV, 24,94 keV, 25,45 keV, 27,20 keV, 27,47 keV, 31,0 keV, 31,7 keV y 35,5 keV. La intensidad total de fotones fue calculada para cada ángulo y normalizada al máximo valor y la desviación fue calculada como el máximo valor menos el mínimo. El procedimiento fue repetido para cada semilla y el promedio de la desviación fue calculado con su desviación standard. Análisis estadístico de Tipo A – un método de evaluar la incerteza por el análisis estadístico de una serie de observaciones– fue aplicado a todas las mediciones.

El siguiente objetivo fue evaluar la anisotropía de la intensidad de fotones producidos principalmente por las soldaduras y puntas, pero además por la pared de titanio, distribuciones de ^{125}I y movimientos del núcleo de plata. Se rotaron las semillas sobre un plano conteniendo el eje longitudinal de la fuente. El espaciamiento de giro dependió de las variaciones observadas en la intensidad de fotones.

Las semillas fueron rotadas en intervalos de 1° en la región donde se observaron las mayores desviaciones y fuera de esa región fueron rotadas en intervalos de 20°. La intensidad total de fotones fue calculada para cada ángulo y normalizada al máximo valor. Este procedimiento fue repetido para cada semilla y valores promedio fueron calculados para cada ángulo con su desviación standard.

Los cambios en la intensidad de fotones para cada pico de ^{125}I fueron analizados para cada posición angular y los resultados fueron comparados a los obtenidos por Rustgi y Weaver para la fuente modelo 6711 [7,8].

2.4. Simulaciones Monte Carlo

La tasa de kerma en aire por unidad de actividad fue calculada para diferentes distancias radial sobre el eje transversal de la fuente utilizando el código Monte Carlo MCNP5. Ese parámetro fue evaluado en esferas concéntricas de 1cm de espesor, cortadas por secciones cónicas de 5°, con el centro de las celdas en 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 105 y 110 cm medidos desde el centro de la semilla.

La fuente de braquiterapia se centró en una esfera de aire seco de 10 metros de diámetro. Se consideró una energía de corte de fotones de 5 keV para simular la atenuación de los rayos x de baja energía por el filtro de aluminio ubicado en el frente del detector WAFAC. El número de historias en cada simulación fue 10^9 . Un total de 10 corridas fueron consideradas con diferente Número de Semilla Azaroso obteniendo valores de incertidumbre inferior al 0,5 %. La tasa de kerma en aire de referencia fue inferida desde el método de extrapolación ajustando los datos por la ecuación [9,10]

$$\dot{K}(r) \cdot r^2 = S_k \cdot (1 + a_0 + a_1 \cdot r^2) \cdot e^{(-\mu_{\text{aire}} \cdot r)} \quad (1)$$

Para los cálculos de dosis absorbida, la fuente fue centrada en una esfera de agua de 60 cm de diámetro. Las dosis fueron calculadas en celdas ubicadas en diferentes ángulos y distancias radiales. Las dosis fueron calculadas en celdas formadas por esferas concéntricas desde 0,01 a 0,2

cm de espesor y cortadas por secciones cónicas de 2° . Los muestreos angulares fueron entre 0° y 180° en incrementos de 10° y los radios medios de las capas esféricas fueron 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 cm. El número de historias fue el mismo como se mencionó anteriormente. Los resultados mostraron una incertidumbre estadística inferior al 1 % dentro de las distancias de interés y a lo largo del eje longitudinal de la fuente las incertidumbres fueron mayores.

Cálculos de $G(r, \theta)$, $g(r)$, $F(r, \theta)$, el factor y la función de anisotropía fueron realizados de acuerdo a la metodología descrita en TG-43 y en TG-43U1. La función de geometría, $G(r, \theta)$, fue calculada con el modelo de fuente lineal, considerando una longitud activa de la fuente lineal de 3,07 mm. La constante de tasa de dosis, Λ , fue obtenida como el cociente de la tasa de dosis sobre el plano transversal en agua a 1 cm, $\dot{D}(1\text{cm}, 90^\circ)$, con el calculado S_k .

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Análisis Radiográfico y Metalográfico

La Figura 3 muestra radiografías de semillas Braquibac™ insertas en un fantoma de acrílico de 3 cm de espesor. Se observó que los núcleos de plata cambiaban suavemente de posición después de sacudir las fuentes. Las soldaduras, el núcleo de plata, y la pared de titanio fueron claramente observadas en las imágenes. Esto permitió el cálculo de dimensiones físicas y la comparación con los valores obtenidos desde estudios metalográficos y de mediciones con un micrómetro.

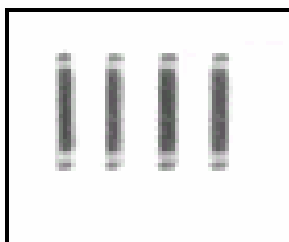


Figura 3: Radiografías de semillas modelo Braquibac™ ^{125}I insertadas en un fantoma de acrílico.

Un corte longitudinal de una soldadura, y de una semilla Braquibac™ son mostrados en la Figura 4. Los promedios de las dimensiones físicas de las semillas fueron $4,675 \pm 0,060$ mm de longitud y $0,779 \pm 0,013$ mm de diámetro. Las fuentes poseen un núcleo de plata de $3,07 \pm 0,10$ mm de longitud, y un diámetro de $0,47 \pm 0,05$ mm, encapsulado por una capa de titanio con un espesor de $0,09 \pm 0,03$ mm, con soldaduras en ambos extremos de espesor $0,39 \pm 0,06$ mm. De acuerdo a la compañía farmacéutica productora de estas fuentes, el material radioactivo ^{125}I se encuentra químicamente adsorbido sobre el núcleo de plata.

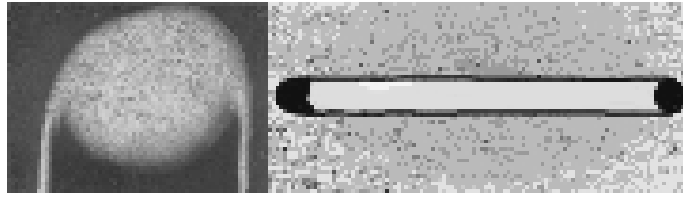


Figura 4: Vista longitudinal a) de una soldadura para una típica semilla Braquibac™ y b) de una típica semilla Braquibac™. Estas imágenes fueron obtenidas desde estudios metalográficos.

3.2. Análisis Espectrométrico

Los espectros de fotones emitido por la fuente modelo 6711 y Braquibac™ fueron obtenidos con un detector planar de HPGe en el plano transversal al eje de la semilla. Espectros de fotones típicos para esas semillas son mostrados en la Figura 5. En el espectro de la nueva fuente, se observaron rayos x característicos de ^{125}I con energías de 27,4 keV correspondiendo a las líneas K_{α} (27,20 keV $K_{\alpha 2}$ y 27,47 keV $K_{\alpha 1}$), de 31,0 keV correspondiendo a las líneas K_{β} (31,0 keV $K_{\beta 1}$, 31,7 keV $K_{\beta 2}$, y 30,49 $K_{\beta 3}$), y a la emisión gama de ^{125}I de 35,5 keV. También se observaron rayos x fluorescente desde el núcleo de plata en 22,1 keV correspondiendo a líneas K_{α} (21,99 keV $K_{\alpha 2}$ y 22,16 keV $K_{\alpha 1}$), y en 25,2 keV correspondiendo a las líneas K_{β} (24,94 keV $K_{\beta 1}$ y 25,45 keV $K_{\beta 2}$). Los picos de escape en 17,4 keV y 21,2 keV fueron observados en ambos espectros como un resultado de la incompleta absorción de energía debido al escape de los fotones K_{α} de germanio desde el detector [7].

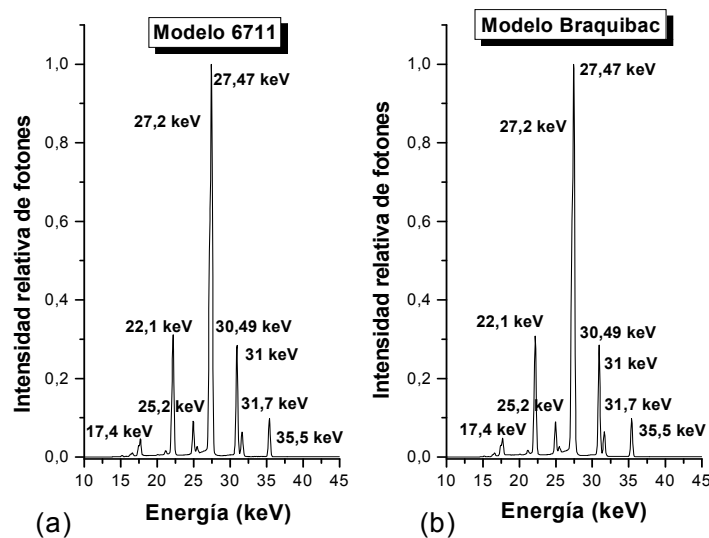


Figura 5: Espectros típicos de fotones para semilla a) Amersham modelo 6711 y b) Braquibac™ ubicadas paralelas al detector. Las intensidades de fotones fueron normalizadas al pico de 27,47 keV.

Los picos de fotones, con la excepción de los debidos a escape, fueron ajustados por una función Gaussiana y las áreas, anchos y alturas fueron calculadas para ambos modelos de fuentes. Diferencias relativas de altura, ancho y área fueron inferiores al 4 %. Se calcularon las intensidades relativas de fotones para la fuente Braquibac™ desde los espectros de fotones. Esos valores fueron comparados con los de la fuente modelo 6711 desde un trabajo de Ling et al., tal como se muestra en la Tabla I.

Tabla I. Espectro de fotones para las fuentes de braquiterapia de ^{125}I modelo 6711 y Braquibac™.

Energía (keV)	Fotón por desintegración Braquibac™ (%)	Energía (keV)	Fotón por desintegración modelo 6711 ^a (%)
22,10	14,60±0,45	22,1	15,35
24,94	3,19±0,14	25,20	4,27
25,45	0,63±0,12	27,40	61,34
27,20	21,10±0,22	31,40	15,34
27,47	42,63±0,54	35,50	3,68
31,00	12,15±0,20		
31,70	2,73±0,33		
35,50	4,50±0,14		

^aLing et al. (1983).

Desde los datos presentados en la tabla, se nota que para la nueva semilla se resolvieron los picos dobles porque se utilizó un detector planar. La intensidad total de fotones fue estudiada cuando las fuentes fueron rotadas sobre su eje longitudinal, y la máxima dispersión fue calculada como $7,14 \pm 4,39$ %. El mismo valor fue obtenido para diferentes picos y el máximo valor encontrado fue 12 %.

Las intensidades de fotones para cada ángulo fueron calculadas a partir de dichos espectros. En la Figura 6 se muestran los resultados en coordenadas polares y cartesianas normalizados al máximo valor. La mínima intensidad de fotones para la nueva semilla fue $31,14 \pm 3,11$ % de la intensidad transversal, y para la fuente modelo 6711 fue 21% [7,8]. También fue calculada la intensidad de fotones originada desde el marcador de rayos x resultando $18,52 \pm 0,47$ % del total de la intensidad de fotones emitida por la fuente Braquibac™ en su dirección transversal y $6,15 \pm 0,28$ % de la intensidad total de fotones en su dirección longitudinal. Rustgi et al. encontraron valores de 20% y 8% respectivamente para la fuente modelo 6711 [7].

La dependencia angular de la intensidad de fotones para la nueva fuente fue analizada en aire rotándola sobre un plano perpendicular a su eje longitudinal usando un detector planar de HPGe. Espectros típicos de fotones son mostrados en la Figura 7 cuando la fuente fue rotada 90°, 70°, 50°, 40°, 30°, 20° y 0° desde su posición horizontal. Las intensidades de fotones fueron normalizadas de acuerdo al pico de 27,47 keV para 90°.

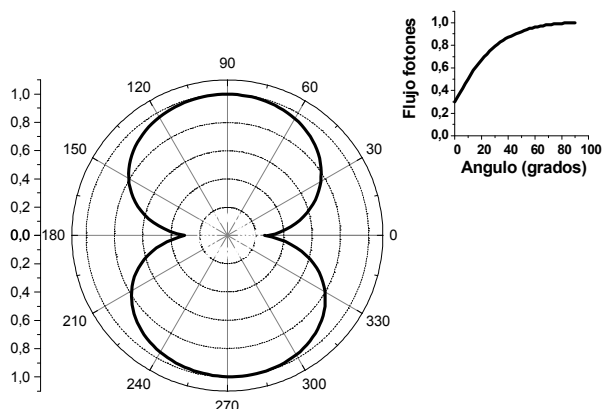


Figura 6: Espectro de fotones mostrando la intensidad de fotones en aire para la fuente Braquibac™ cuando se rotó sobre un plano transversal a su eje longitudinal en 90°, 70°, 50°, 40°, 30°, 20° y 0° tal como se mostró en la Figura 2a. Las intensidades de fotones fueron normalizadas al pico de 27,47 keV en 90°.

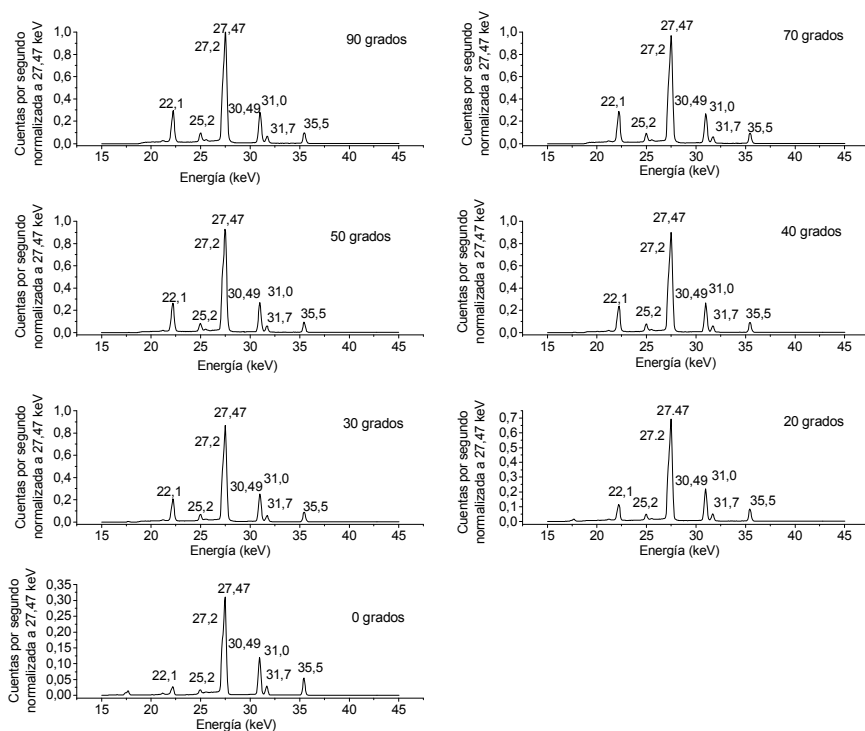


Figura 7: Intensidad de fotones en aire para la fuente Braquibac™ en coordenadas polar y cartesiana cuando la fuente es rotada sobre un plano transversal a su eje longitudinal como se muestra en la Figura 2a. Estos datos fueron obtenidos desde los presentados en la Figura 6.

La variación angular de la intensidad de fotones para los picos en 22,10 keV, 24,94 keV, 25,45 keV, 27,20 keV, 27,47 keV, 30,49 keV, 31,0 keV, 31,7 keV y 35,5 keV fue también analizada para la fuente Braquibac™. Esos valores, normalizados al máximo valor en 90°, son mostrados con un gráfico tridimensional en la Figura 8. Los picos gama y rayos x de ¹²⁵I y los rayos x desde el núcleo de plata aumentaron monótonamente en intensidad cuando el ángulo varió de 0° a 90°. Esto puede ser atribuido al hecho de que la mayor parte del material radiactivo fue químicamente adsorbido en las paredes del tubo de plata. Otro factor que contribuyó fue la preferencial atenuación de fotones en la dirección lateral, donde la pared es más delgada que las soldaduras presentes en los extremos.

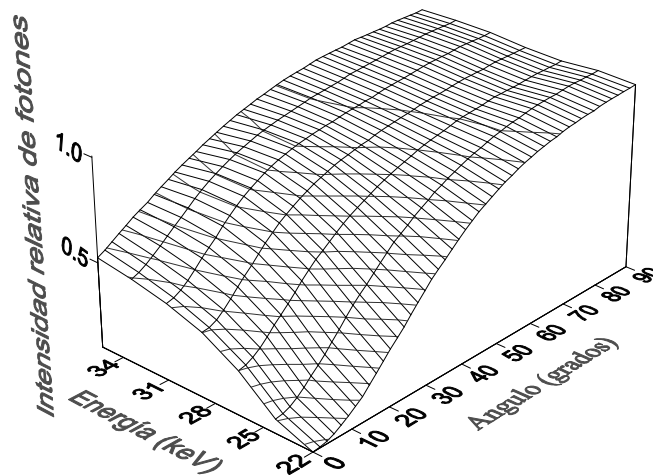


Figura 8: Gráfico en 3-D de la intensidad de fotones en aire para la fuente Braquibac™ con diferentes ángulos y energías. La intensidad de fotones fue normalizada al pico en 27,47 keV.

33 . Simulación Monte Carlo

Valores de la función de dosis radial $g(r)$ son mostrados en la Tabla II. Las incertidumbres fueron inferiores a 10 % en todos los casos. Se compararon los valores de la función de dosis radial con los de la fuente modelo 6711 y las diferencias fueron del orden del 20 % [4].

La función de dosis radial fue ajustada desde 0,5 - 10 cm a un polinomio de orden quinto de la forma

$$g(r) = a_0 + a_1 \cdot r + a_2 \cdot r^2 + a_3 \cdot r^3 + a_4 \cdot r^4 + a_5 \cdot r^5 \quad (2)$$

donde: $a_0 = 1,1192956$, $a_1 = -0,074927972$, $a_2 = -0,06254103$, $a_3 = 0,015244235$, $a_4 = -0,0013762375$, $a_5 = 4,4848341E-5$, y factor de correlación $r^2 = 0,9999581$. También fue ajustada a una función exponencial de la forma:

$$g(r) = c_1 \cdot e^{(-\mu_1 \cdot r)} + c_2 \cdot e^{(-\mu_2 \cdot r)} \quad (3)$$

recomendada por Furhang y Anderson [12]. Los valores de los parámetros para este caso fueron $c_1 = 1,6780706$, $\mu_1 = 0,29901031$, $c_2 = -0,58432595$, $\mu_2 = 0,86713256$ y $r^2 = 0,99998061$. Valores de la función de anisotropía en dos dimensiones, $F(r, \theta)$, son mostrados en la Tabla II, en distancias radial desde 0,5 a 10 cm. Las diferencias relativas con la fuente modelo 6711, basadas en datos publicados por Rivard et al. fueron inferiores al 15 % [4]. Para el caso específico de 0,5 y 1cm en 0° , las diferencias excedieron el 20 %.

Como fue recomendado por Furhang y Anderson, $F(r, \theta)$ fue ajustada por la función [11]:

$$F(r, \theta) = 1 - (a + b \cdot \theta) \cdot \cos(\theta) \cdot e^{(-c \cdot r)} \quad (4)$$

donde $a = a_0 + a_1 r$, $b = b_0 + b_1 r$, $c = c_0 + c_1 r$, y $a_0 = 0.81605$, $a_1 = 0.0388459$, $b_0 = -0,89943$, $b_1 = -0,0112982$, $c_0 = -0,234013$, y $c_1 = 0,0116102$. La constante de tasa de dosis fue calculada a partir del valor de la tasa de dosis obtenida con el código MCNP5, resultando igual a $0,880 \pm 0,080$ cGy $h^{-1} U^{-1}$. Este valor fue 10 % inferior que el de la fuente modelo 6711. Se calculó el cociente de la actividad aparente con la actividad real de la fuente utilizando el código MCNP5 tal como fue recomendado por Burns y Raeside, resultando igual a 2,10 [13]. El factor promedio de anisotropía fue calculado desde los valores de la función de anisotropía y los resultados se muestran en la Tabla II. La constante de anisotropía, $\Phi(r)$, fue calculada de acuerdo a la metodología sugerida por Nath et al. [3]. Para valores de r desde 0,5 a 10 cm $\Phi(r) = 0,941$, para $r = 0,5$ a 5 cm $\Phi(r) = 0,957$, y para $r = 1$ a 7cm $\Phi(r) = 0,941$. Estos valores son un 1 % superiores a los reportados por Nath et al. para la fuente modelo 6711 [3].

Tabla II. $g(r)$, $\Phi(r)$, tasa de dosis por unidad de Sk, y $F(r, \theta)$ en agua para la fuente de braquiterapia Braquibac™.

r(cm)/ang	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tasa de dosis/Sk (cGy cm ² h ⁻¹ mCi ⁻¹)	3,630	0,880	0,179	0,062	0,027	0,013	0,0067	0,0037	0,0021	0,0012	0,0007
$g(r)$	1,066	1,000	0,819	0,640	0,489	0,369	0,277	0,205	0,156	0,111	0,082
$\Phi(r)$	0,963	0,940	0,940	0,944	0,946	0,947	0,944	0,946	0,917	0,949	0,946
0	0,203	0,285	0,413	0,514	0,579	0,587	0,631	0,654	0,633	0,626	0,682
10	0,346	0,426	0,510	0,557	0,587	0,612	0,630	0,644	0,636	0,662	0,666
20	0,602	0,625	0,672	0,705	0,721	0,739	0,746	0,751	0,731	0,765	0,766
30	0,794	0,784	0,803	0,820	0,829	0,834	0,835	0,842	0,816	0,853	0,842
40	0,905	0,892	0,895	0,903	0,908	0,906	0,906	0,910	0,882	0,915	0,911
50	0,978	0,962	0,956	0,959	0,960	0,958	0,955	0,954	0,926	0,960	0,947
60	1,017	1,007	0,997	0,992	0,992	0,990	0,988	0,985	0,952	0,983	0,980
70	1,031	1,025	1,021	1,017	1,014	1,010	1,008	1,008	0,973	1,004	1,002
80	0,999	1,032	1,031	1,027	1,025	1,021	1,016	1,019	0,986	1,018	1,013

4. CONCLUSIONES

La semilla modelo Braquibac™ fue sometida a un detallado análisis espectrométrico, radiográfico, metalográfico y dosimétrico. Los resultados obtenidos fueron comparados con los de la fuente modelo 6711.

La nueva fuente de Iodo-125 mostró atractivas características radiográficas y metalográficas, y aceptable isotropía en la intensidad de fotones ^{125}I - plata. En general, los resultados metalográficos mostraron que las semillas cumplen con confianza y seguridad los requerimientos necesarios para el uso en pacientes.

A partir de los resultados obtenidos de estudios espectrométricos, se confirmó que la deposición de ^{125}I sobre el núcleo de plata era uniforme. Por otro lado, los espectros de fotones obtenidos con el detector de HPGe para la nueva semilla y la 6711 fueron similares.

Las radiografías mostraron que la estructura interna de la semilla Braquibac™ es similar a la correspondiente a la semilla modelo 6711 y que el núcleo de plata puede tomar diferentes posiciones en ambas fuentes.

Los resultados de los estudios de intensidad de fotones para la nueva semilla muestran un acuerdo de un 10 % con los resultados publicados para la fuente modelo 6711 [7]. Cuando se compararon los espectros de fotones de ambas fuentes (Tabla I), la mayor diferencia en la intensidad relativa fue aproximadamente de 16 %. Sin embargo, es importante tener en cuenta que para el espectro de la nueva fuente se discriminaron los picos dobles.

Las propiedades dosimétricas de la nueva fuente difieren levemente con los de la fuente modelo 6711 según los datos reportados por Heintz et al. [14]. No está claro si esas diferencias son debidas a simulación Monte Carlo o a los detalles en las técnicas experimentales. Se concluye que la semilla Braquibac™ es similar a la semilla modelo 6711, y que puede ser utilizada en pacientes sin riesgos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Lic. Diana Feld de la Comisión Nacional de Energía Atómica, al personal del Departamento de rayos x del Hospital Roffó y al personal de la Autoridad Regulatoria Nuclear por la disponibilidad de los detectores de HPGe utilizados en esta investigación. A los Drs. Caro, Baró y Dennis Duggan por sus sugerencias.

REFERENCIAS

1. Perez, C.A., Grigsby, P.W., and Williamson, J.F., *Clinical applications of brachytherapy. I. Low dose-rate, in Principles and Practice of Radiation Oncology* 3rd. Ed. Edited by C.A. Perez and L.A. Brady, Lippincott-Raven, Philadelphia, United States (1997).

2. Baró, G.B., Kiefer, J.C., Gutiérrez, H.R., Ughetti, R., Nicolini, J.O., “Argentine production of ^{125}I seeds for tumor brachytherapy”, *Fifth International Conference on Isotopes*, Brussels, Belgium, 25-29 April (2005).
3. Nath, R., Anderson, L., Luxton, G., Weaver, K.A., Williamson, J.F., Meigooni, A.S., “Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group N° 43”, *Med. Phys.*, **22 (2)**, p.209-234 (1995).
4. Rivard, M.J., Coursey, B.M., DeWerd, L.A., Hanson, W.F., Huq, M.S., Ibbot, G.S., Mitch, M.G., Nath, R., Williamson, J.F., “Update of AAPM Task Group No. 43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations”, *Med. Phys.*, **31 (3)**, p.633-674 (2004).
5. Williamson, J.F., Coursey, B.M., DeWerd, L.A., Hanson, W.F., Nath, R., Rivard, M.J., Ibbot, G.S., “On the use of apparent activity $-A_{\text{app}}$ -for treatment planning of ^{125}I and ^{103}Pd interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the American Association of Physicists in Medicine Radiation Therapy Committee Subcommittee on Low-Energy Brachytherapy Source Dosimetry”, *Med. Phys.*, **26 (12)**, p.2529-2530 (1999).
6. Wierzbicki, J.G., Waid, D.D., Rivard, M.J., Arterberry, V.E., “Radiographic characterization and energy spectrum of the IoGold ^{125}I source Model 3631-A/S”, *Med. Phys.*, **26(3)**, p.392-394 (1999).
7. Rustgi, S.N., “Radiation spectral characteristics of a new double-walled Iodine-125 source”, *Med. Phys.* **19(4)**, p.927-931 (1992).
8. Weaver, K., “Anisotropy functions for ^{125}I and ^{103}Pd sources”, *Med. Phys.*, **25(12)**, p.2271-2278 (1998).
9. Williamson, J.F., “Monte Carlo Modeling of the transverse-axis dose distribution of the Model 200 ^{103}Pd interstitial brachytherapy source”, *Med. Phys.*, **27 (4)**, p.643-654 (2000).
10. Hedtjörn, H., Carlsson, G. A., Williamson, J.F., “Monte Carlo-aided dosimetry of the symmetry Model 125.S06 ^{125}I , interstitial brachytherapy seed”, *Med. Phys.*, **27(5)**, p.1076-1085 (2000).
11. Ling, C., Yorke, E., Spiro, I., Kubiawicz, D., Bennett, D., “Physical dosimetry of ^{125}I seeds of a new design for interstitial implant”, *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, **9**, p.1747–1752 (1993).
12. Furhang, E.E and Anderson, L. L., “Functional fitting of interstitial brachytherapy dosimetry data recommended by the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 43”, *Med. Phys.*, **26 (2)**, p.153-160 (1999).
13. Burns, G.S., and Raeside, D.E., “Two-dimensional dose distribution around a commercial ^{125}I seed”, *Med. Phys.*, **15(1)**, p.56-60 (1988).
14. Heintz, B.H., Wallace, R.E., Hevezi, J.M., “Comparison of I-125 sources used for permanent interstitial implants”, *Med. Phys.*, **28(4)**, p.671- 682 (2001).