

## Calibración de un Sistema TLD para estimar dosis personal en campos de radiación gamma-neutrones

E N Villegas<sup>1</sup>, F I Somarriba<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.

E-mail: [evillegas@unan.edu.ni](mailto:evillegas@unan.edu.ni)

**Resumen:** Actualmente en Nicaragua no existe un servicio de dosimetría personal de neutrones. En este trabajo, se realizó la calibración de un lote de dosímetros albedo de neutrones consistentes en dos pares de detectores  $^6\text{LiF}$  y  $^7\text{LiF}$  (Mg, Ti). Se obtuvo la sensibilidad de los dosímetros y del lector utilizando una fuente de  $^{137}\text{Cs}$ , y se encontró un factor de calibración para neutrones con una fuente de  $^{241}\text{AmBe}$ . Se realizaron pruebas de reproducibilidad y homogeneidad del lote, y se determinó el mínimo detectable del sistema. Esta calibración permitirá empezar el monitoreo de personal expuesto a fuentes de neutrones en el país.

**Palabras clave:** dosimetría de neutrones, dosimetría termoluminiscente, monitoreo personal, neutrones albedo, campos mixtos.

**Abstract:** Currently Nicaragua has no personal neutron dosimetry system. The calibration of a batch of albedo neutron dosimeters consisting of two pairs of  $^6\text{LiF}$  and  $^7\text{LiF}$  (Mg, Ti) detectors was done. The dosimeter and reader sensitivities were obtained using a  $^{137}\text{Cs}$  source, and a neutron calibration factor was found with a  $^{241}\text{AmBe}$  source. Reproducibility and homogeneity tests were performed, and the detection limit of the system was determined. This calibration will allow the beginning of neutron personal monitoring in the country.

**Keywords:** neutron dosimetry, thermoluminescence dosimetry, personal monitoring, albedo neutrons, mixed fields.

### 1. INTRODUCCIÓN

La dosimetría de neutrones suele ser una tarea más complicada que la dosimetría gamma. La emisión de neutrones en una fuente está casi siempre acompañada de radiación gamma y debe realizarse la separación de las componentes de la dosis para su evaluación, ya que el factor de peso para obtener la dosis equivalente puede ser hasta 20 veces mayor para la radiación neutrónica que para la radiación gamma (ICRP, 2007).

Otro de los problemas comunes de los detectores de neutrones es su marcada dependencia energética. La mayoría de los detectores suelen ser más sensibles a neutrones térmicos o de bajas energías y tienden a volverse insensibles al aumentar la energía.

Los dosímetros albedo se basan en la detección de los neutrones termalizados que han interactuado con el hidrógeno del cuerpo. De esta manera puede realizarse la dosimetría de neutrones sobre un mayor espectro de energías usando el mismo detector.

En Nicaragua, las fuentes de neutrones que se utilizan provienen de medidores nucleares de densidad y humedad del sector industrial. Los trabajadores que utilizan estas fuentes son monitoreados por medio de dosímetros termoluminiscentes para conocer la dosis gamma que reciben, pero no se monitorea la contribución de los neutrones. Aunque anteriormente se estimaba que esta contribución era despreciable y no era necesaria la dosimetría con detectores de neutrones, trabajos más recientes (C. Domingo, 2009) han mostrado que la contribución de dosis de los neutrones pueden ser casi tan grande como la contribución gamma. Surge así la necesidad de calibrar un sistema dosimétrico para medir dosis de neutrones, ya que actualmente no existe uno en nuestro país.

### 1.1 Descripción de los dosímetros

El dosímetro utilizado en este estudio consiste en dos pares de detectores termoluminiscentes de  ${}^6\text{LiF}$  y  ${}^7\text{LiF}$ , colocados en las 4 posiciones que se señalan en la figura 1. Un detector de  ${}^6\text{LiF}$ , y otro de  ${}^7\text{LiF}$  se encuentran respectivamente en las posiciones 1 y 2, frente a una ventana beta que permite medir neutrones incidentes y dosis superficial gamma. El otro par de detectores, uno de  ${}^7\text{LiF}$  y otro de  ${}^6\text{LiF}$  se encuentran en las posiciones 3 y 4, respectivamente, detrás de una



**Figura 1.** Composición de un dosímetro albedo. De izquierda a derecha: slide, porta slide y dosímetro completo con cover albedo. Pueden observarse cristales en las 4 posiciones del slide.

capa de plástico y con una ventana albedo por la parte trasera del detector, que permite medir dosis

profunda gamma y neutrones albedo (Piesch, 1985).

## 2. MÉTODOS

### 2.1. Calibración con la fuente gamma

Previamente a la calibración de los dosímetros en una fuente de neutrones se realizó la calibración con una fuente de  ${}^{137}\text{Cs}$ . Para el cálculo de la dosis se toma en cuenta correcciones por la dosis cero y por la sensibilidad individual de los dosímetros.

La ecuación que se utiliza para el cálculo de dosis de los dosímetros es:

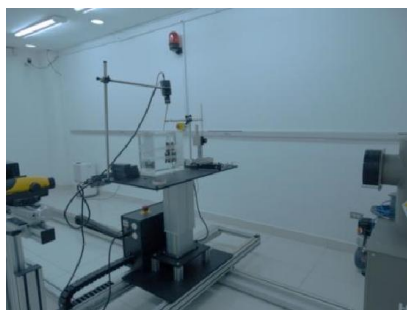
$$D = \frac{C_B - C_Z}{F_R \cdot F_S} \cdot F_I \quad (1)$$

Donde  $D$  es la dosis en  $\mu\text{Sv}$ ,  $C_B$  las cuentas detectadas por el lector,  $C_Z$  las cuentas correspondientes a la dosis cero,  $F_R$  es el factor de sensibilidad del lector,  $F_S$  el factor de sensibilidad individual de cada cristal con respecto a los cristales utilizados para la calibración del lector y  $F_I$  es la dosis en  $\mu\text{Sv}$  que entrega el irradiador local por vuelta.

$F_S$  se determinó irradiando a una dosis Hp(10) de 1 mSv en la fuente de  ${}^{137}\text{Cs}$ , sobre un maniquí de agua, como se muestra en la figura 2.  $F_I$  se determinó por medio de la fuente de referencia de  ${}^{137}\text{Cs}$ , comparando el resultado de dosímetros irradiados a 1 mSv en la fuente y a 10 vueltas en el irradiador de mesa, siguiendo los procedimientos del manual.

$F_R$  se calibra por día, y puede hacerse con un lote de dosímetros irradiados en el irradiador de mesa local o en la fuente de referencia. En caso de que el factor  $F_R$  se obtenga directamente en la fuente, la ecuación para la dosis es

$$D = \frac{C_B - C_Z}{F_R \cdot F_S} \quad (2)$$



**Figura 2.** Posicionamiento de los dosímetros en un maniquí de agua para irradiación en  $^{137}\text{Cesio}$ .

### 2.1. Cálculo del factor $K_n$

El factor de calibración de neutrones se determinó por medio de la ecuación (ALNOR, 1986)

$$K_n = \frac{H_{n, ref}}{D_4 - D_3} \quad (3)$$

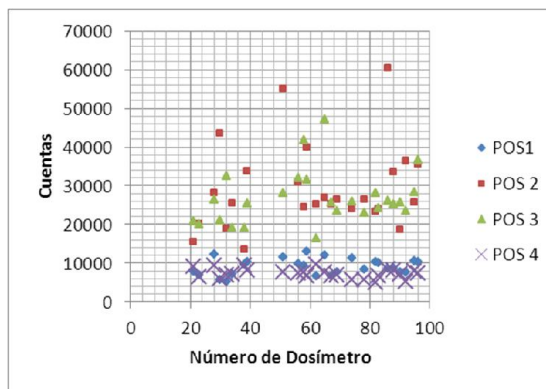
Donde  $H_{ref}$  es la dosis de referencia a la que se irradiaron los dosímetros,  $D_4$  es la dosis en la posición 4 del dosímetro y  $D_3$  es la dosis en la posición 3.

Los dosímetros se irradiaron en una fuente de neutrones de  $^{241}\text{AmBe}$  en el laboratorio de Tecnofísica, México. Las dosis  $D_4$  y  $D_3$  se calcularon utilizando la ecuación (1) para calcular la dosis de los dosímetros irradiados y corrigiendo por la dosis de los dosímetros testigo.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Factores de Calibración

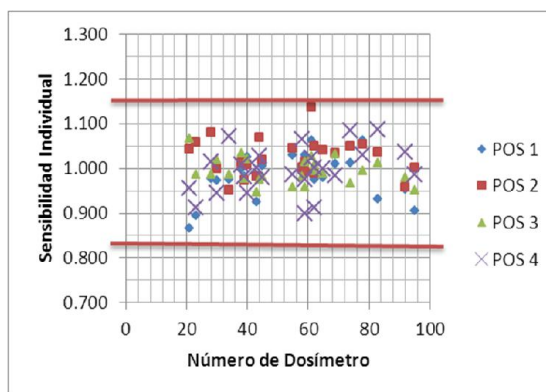
En la composición de los dosímetros, se utilizaron dos lotes de pellets, uno de  $^6\text{LiF}$  y otro de  $^7\text{LiF}$  (Mg, Ti), de Wedholm Medical. Los cristales de  $^7\text{LiF}$  presentaron cuentas de dosis cero más altas y mayor dispersión, como se ve en la figura 3. Esto pudo haber contribuido al límite detectable, que fue mayor para los cristales de  $^7\text{LiF}$ .



**Figura 3.** Dispersión de las cuentas de dosis cero para cristales de  $^6\text{LiF}$  (posiciones 1 y 4) y  $^7\text{LiF}$  (posiciones 2 y 3).

Una vez realizada la calibración del factor del lector para cada posición del dosímetro, la distribución de los factores se volvió más homogénea. La figura 4 muestra la distribución de los factores de sensibilidad individual de todos los cristales.

La sensibilidad individual del cristal representa la desviación individual de sensibilidad respecto al lote de dosímetros que se utiliza para la calibración del lector. Esta se calibró para cada uno de los cristales en la fuente de  $^{137}\text{Cesio}$ .



**Figura 4.** Dispersión de los valores de sensibilidad individual para los  $^6\text{LiF}$  (posiciones 1 y 4) y  $^7\text{LiF}$  (posiciones 2 y 3). Las líneas rojas indican las tolerancias recomendadas.

La tabla 1 muestra los valores promedio para los factores calculados.

Posición	Cero (cuentas)	Sensibilidad Individual	Sensibilidad del Lector (cuentas/ $\mu$ Sv)
P1	9062 $\pm$ 2087	0,98 $\pm$ 0,05	77483 $\pm$ 1534
P2	29265 $\pm$ 11013	1,02 $\pm$ 0,04	152225 $\pm$ 6764
P3	26877 $\pm$ 6973	0,99 $\pm$ 0,03	153742 $\pm$ 8111
P4	7326 $\pm$ 1262	1,00 $\pm$ 0,05	75650 $\pm$ 2200

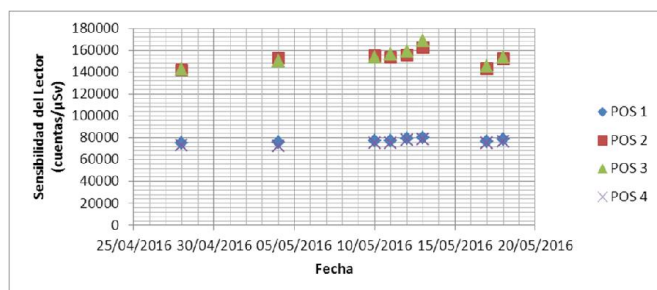
**Tabla 1.** Valores promedio de los factores de calibración calculados para los cristales de las 4 posiciones del dosímetro.

La sensibilidad del lector utilizado se calibró utilizando un lote de 5 dosímetros irradiados en una dosis de 1 mSv en la fuente de cesio. La figura 5 muestra la variación del factor de sensibilidad del lector a través del tiempo.

También fue calibrada la dosis por vuelta del irradiador local, para cada posición del dosímetro particular. Esto se muestra en la tabla 2.

Posición	Factor del Irradiador ( $\mu$ Sv/vuelta)
P1	316
P2	334
P3	343
P4	321

**Tabla 2.** Factores de Calibración del Irradiador de Mesa de  $^{90}\text{Sr}$  obtenidos para las 4 posiciones del dosímetro.



**Figura 5.** Variación de los valores de sensibilidad del lector en un período de un mes, para las 4 posiciones del dosímetro.

### 3.2. Factor de dosis de neutrones

El valor de  $K_n$  calculado utilizando la ecuación 3 fue de 9,80, como se muestra en la tabla 1.

Posición	Irradiación ( $\mu$ Sv)	Fondo ( $\mu$ Sv)	Dosis Neta ( $\mu$ Sv)
P1	414	184	230
P2	312	197	116
P3	294	216	79
P4	342	161	181
$K_n$	9,80 $\pm$ 1,17		

**Tabla 3.** Valores promedio de las dosis de la irradiación con la fuente de  $^{241}\text{AmBe}$  y de los dosímetros testigos para el cálculo del factor de calidad de neutrones.

El radio

$$\frac{D_4 - D_3}{D_1 - D_2} \quad (4)$$

Donde  $D$  es la dosis neta de los dosímetros irradiados mostrada en la tabla 3, varía en dependencia de la energía del haz de neutrones. Este puede usarse para estimar la energía del haz de neutrones y corregir por dependencia energética, si se esperan espectros variables en un mismo lugar de monitoreo.

En nuestro caso, con la fuente de  $^{241}\text{AmBe}$ , el valor fue de 1,1.

### 3.3. Separación de las dosis

La dosis de neutrones obtenida puede separarse en sus distintas energías mediante las siguientes ecuaciones (ALNOR, 1986):

$$H_{tér, epi} = \frac{D1 - D2}{70} \quad (5)$$

Para la dosis debido a neutrones térmicos y epitérmicos.

$$H_{tér, int} = 0.015(D1 - D3) + 0.07(D4 - D3) \quad (6)$$

Para la dosis debido a neutrones térmicos e intermedios, y

$$H_{rap} = H_n - H_{ter, inter} \quad (7)$$

Para la dosis debido a neutrones rápidos.

En el caso de los dosímetros irradiados a 1 mSv en  $^{241}\text{AmBe}$ , se obtuvo un valor de 1,6  $\mu\text{Sv}$  para la dosis de neutrones térmicos y epitérmicos, 8,9  $\mu\text{Sv}$  para la dosis de neutrones térmicos e intermedios, y 990,8  $\mu\text{Sv}$  para la dosis de neutrones rápidos.

### 3.4. Limite de Detecção

La ecuación utilizada para el cálculo del límite de detección es de la forma:

$$L_D = 2t\sigma \quad (8)$$

Donde  $t$  es el valor de la distribución de t-student para el número de grados de libertad utilizados y un nivel de confianza del 95%.

Posición	D1 (mSv)	D2 (mSv)	D3 (mSv)	D4 (mSv)
$\sigma$	0,019	0,044	0,052	0,019
Límite de Detecção (mSv)	0,07	0,15	0,18	0,07

**Tabla 4.** Valores de dosis utilizados para el cálculo del límite de detección en cada posición del dosímetro.

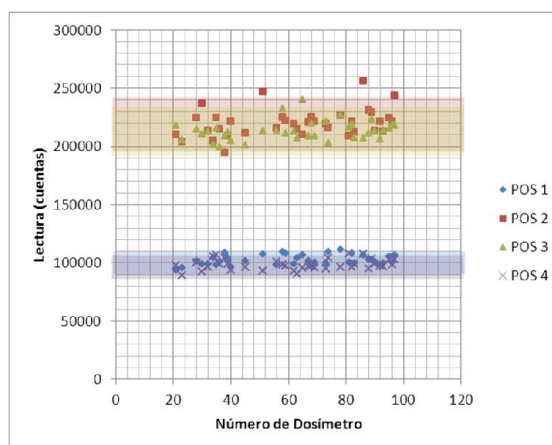
Se tomaron lecturas de un lote de 24 dosímetros.

### 3.5. Homogeneidad y Reproducibilidad del lote

Para la prueba de reproducibilidad del lote se irradiaron los dosímetros a una dosis de 1 mSv con la fuente de cesio 3 veces, y se calculó el coeficiente de variación. Ninguno fue mayor al 5%.

La distribución de la respuesta obtenida de los dosímetros para una irradiación se muestra en la figura 6. Los puntos que están fuera de las bandas de colores representan cristales que no cumplen

con las tolerancias, y que no deberían utilizarse para estudios posteriores.



**Figura 6.** Distribución de las cuentas obtenidas del dosímetro después de una irradiación a 1 mSv para las 4 posiciones. Las bandas de colores representan las tolerancias respectivas de cada posición.

## 4. CONCLUSIONES

Se realizó la calibración del lote de dosímetros con la fuente de  $^{137}\text{Cesio}$  y se encontró el factor de calidad de neutrones para la fuente de  $^{241}\text{AmBe}$ , que fue de 9,80. El límite detectable encontrado fue de 0,18 mSv para este lote de dosímetros. Los cristales mostraron una homogeneidad y repetibilidad aceptables en las pruebas realizadas.

## 7. REFERENCIAS

- ALNOR. (1986). Albedo neutron dosimetry with TLD.
- C. Domingo, K. A.-O. (2009). Neutron dosimetric studies of density/moisture gauge operators during transport and usage. *Radiation Measurements*.
- H. Miranda, J. G. (2005). Procedimiento experimental para la calibración y respuesta de dosímetros TLD-600 y TLD-700 en capos mixtos gamma-

- neutrón de una fuente de Am-Be.  
*International Nuclear Atlantic Conference* .
- H. R. Vega-Carrillo, K. A.-G. (2014). Passive neutron area monitor with pairs of TLDs as neutron detector. *Radiation Measurements*.
- ICRP. (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*.
- International Electrotechnical Commission. (2006). *IEC 61066. Thermoluminescence dosimetry systems for personal and environmental monitoring* .
- M.M. Martins, C. M. (2007). Calibration of a TLD albedo individual neutron monitor. *International Nuclear Atlantic Conference*.
- Piesch, B. (1985). Albedo neutron dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente al Ing. David Espejo Mancillas y al Lic. David Espejo Villalobos, del laboratorio de Tecnofísica Radiológica, S.C., por proveer la irradiación de los dosímetros en  $^{241}\text{AmBe}$ .