

# Calibración de una sonda de captación para la monitorización del Personal Ocupacionalmente Expuesto

Erick Mora Ramírez<sup>1</sup>, Maikol Salas-Ramírez<sup>2</sup>.

1 - Servicio de Medicina Nuclear, Hospital San Juan de Dios.

2 - Servicio de Medicina Nuclear, Hospital México.

## Resumen

**Introducción.** Con el auspicio del Organismo Internacional de Energía Atómica, bajo el proyecto RLA/9/066, "Fortalecimiento y actualización de las capacidades técnicas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores ocupacionalmente expuestos a la radiación ionizante (TSA2)", se llevó a cabo un ejercicio de inter-comparación en el cual se enviaron dos fuentes de  $^{133}\text{Ba}$ , una que servía como patrón de calibración para nuestro equipo y otra que era una fuente incógnita. **Objetivo.** El objetivo de este trabajo es mostrar la metodología desarrollada para calibrar el equipo utilizado, además de mostrar el cálculo de la incertidumbre asociada a la determinación del factor de calibración (eficiencia). **Materiales y métodos.** El equipo usado para la calibración es una sonda de captación tiroidea marca Capintec, modelo Captus-3000, con un detector de NaI, con un diámetro y espesor de cristal de 2", utilizando una fuente de  $^{133}\text{Ba}$  calibrada en el Instituto de Radioprotección y Dosimetría (IRD) de Brasil con una actividad inicial de 30.206 Bq. La fuente está diseñada de modo que simula la forma de la glándula tiroidea y está colocada dentro de un maniquí que simula las condiciones de profundidad y dispersión de la glándula en el cuello. Se realiza una calibración por energía utilizando fuentes de  $^{137}\text{Cs}$ , de  $^{152}\text{Eu}$  y de  $^{133}\text{Ba}$ , localizando los canales de energía asociados a los picos de energía de cada isótopo. Se calculó la eficiencia de detección para las siguientes distancias fuente-detector: 17, 20, 25, 30 y 35 cm. La región de interés se definió como la ventana del 40% para el fotopico de 364 keV del  $^{131}\text{I}$ ; la ventana de energía se ubicó entre 287 keV (canal 146) y 433 keV (canal 218). Se determinaron los canales asociados a estas energías. Se realizaron 5 mediciones con un tiempo de 5 min cada una. Se determinó la actividad equivalente de  $^{131}\text{I}$  de la fuente de  $^{133}\text{Ba}$  y se encontró la actividad mínima detectable del equipo. **Resultados.** Se generó una curva de canal vs energía del isótopo, la cual tiene un comportamiento lineal; en términos de la eficiencia se obtuvo un factor de calibración que se incrementa al disminuir la distancia fuente-detector, obteniéndose un comportamiento lineal para este factor. Además, se muestran los resultados de la determinación de la incertidumbre asociada a los factores de calibración determinados según la distancia fuente-detector, el resultado de la actividad equivalente de  $^{131}\text{I}$  y la actividad mínima detectable del equipo. **Conclusiones.** Se presenta una metodología para calibrar un equipo que es utilizado en el monitoreo del personal ocupacionalmente expuesto y el cálculo de incertidumbre asociado a la eficiencia del equipo. Estos resultados son importantes a la hora de implementar un programa de monitoreo por eventual incorporación de material radioactivo.

## Abstract

**Introduction.** With the auspices of the International Atomic Energy Agency under the RLA/9/066 project "Strengthening and upgrading the technical capabilities to protect the health and safety of workers occupationally exposed to ionizing radiation (TSA2)", an inter-comparison exercise was performed using two sources of  $^{133}\text{Ba}$ ; the first one was a calibration standard for our detector equipment and the second one was an unknown source. **Objective.** The objective of this paper is to show a methodology developed to calibrate detection instrument, and to show the calculation of uncertainty associated to the calibration factor (efficiency). **Materials and methods.** The equipment used for calibration was a thyroid uptake probe Capintec, model Captus-3000 with a NaI detector with a crystal diameter and thickness of 2". The  $^{133}\text{Ba}$  sources were calibrated in the Institute of Radioprotection and Dosimetry (IRD) in Brazil, with an initial activity of 30,206 Bq. The source was designed to simulate the shape of the thyroid gland and it was positioned in a phantom to simulate the conditions of depth and dispersion of the gland in the neck. Calibration was performed using energy sources of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  and  $^{152}\text{Eu}$  to locate the energy channels associated with the energy peaks of each isotope. Detection efficiency was determined for the following source-detector distances: 17, 20, 25, 30 and 35 cm. The region of interest was defined as a 40% window for the 364 keV photopeak of  $^{131}\text{I}$ ; the

energy window was between 28 keV (channel 146) and 433 keV (channel 218). The  $^{131}\text{I}$  equivalent activity was determined by 5 measurements of 5 minutes each one, also the minimum detectable activity of  $^{131}\text{I}$  was established with the  $^{133}\text{Ba}$  source.

**Results.** A calibration curve was obtained which has a linear behavior; in terms of efficiency, the calibration factor increases with a decrease of the source-detector distance. Uncertainty associated to calibration factors for each source-detector distance was determined, as also was the equivalent activity of  $^{131}\text{I}$  and the minimum detectable activity. **Conclusions.** This work describes a methodology for the calibration of a detector system that is used in the monitoring of occupationally exposed workers. Also, the calculation of uncertainty associated with the equipment efficiency was determined; these results are important to implement a monitoring program to detect eventual incorporation of radioactive material.

## Introducción

El Servicio de Medicina Nuclear del Hospital San Juan de Dios cuenta con una sonda de captación utilizada para la determinación de incorporación de  $^{131}\text{I}$  en pacientes con hipertiroidismo y en estudios de dosimetría interna de pacientes con cáncer de tiroides. Debido a la utilidad de este equipo para cuantificar la incorporación accidental u ocupacional de radionucleidos de uso médico y mediante el apoyo técnico y material del proyecto RLA/9/066, "Fortalecimiento y actualización de las capacidades técnicas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores ocupacionalmente expuestos a la radiación ionizante (TSA2)" de la OIEA, se realizó una inter-comparación para validar el método de calibración de la sonda mediante una fuente de  $^{133}\text{Ba}$  y un maniquí, que en conjunto simulan la glándula tiroides y cuello de un ser humano, acorde con las recomendaciones internacionales de protección radiológica ocupacional<sup>(1)</sup>.

## Materiales y método

Para este estudio se contó con una fuente patrón para realizar la calibración y con una fuente incógnita con la cual se realizó la inter-comparación; ambas fuentes fueron calibradas en el Instituto de Radioprotección y Dosimetría (IRD, Río de Janeiro, Brasil).

El sistema de detección utilizado fue una sonda de captación tiroidea (Capintec Captus-3000, New Jersey, EEUU), la cual cuenta con un cristal de NaI (TI) de geometría cilíndrica de 2" de espesor y 2" de diámetro, protegido por un colimador de plomo que evita la interacción con fotones que no correspondan de la zona de interés. La sonda cuenta con un sistema multicanal que permite realizar análisis de espectrometría gamma y cuantificar la actividad de los radionucleidos.

## Control de calidad de la sonda de captación

Como para todo equipo de medición utilizado en estudios médicos, existe un protocolo de control de calidad de los parámetros de la sonda, que se describe esquemáticamente en la tabla a continuación.

Prueba	Propósito	Periodicidad
1-Inspección física	Verificar que todos componentes se encuentran en buen estado	Diaria
2-Constancia	Evaluar la sensibilidad del sistema. Se utiliza una fuente de largo semiperíodo de desintegración y con una alta probabilidad de emisión de un único fotón ( $^{137}\text{Cs}$ )	Diaria
3-Resolución energética	Evaluar el comportamiento de la resolución energética del sistema, parámetro que tiende a derivar en el transcurso del tiempo. Se utiliza una fuente de largo semiperíodo de desintegración y con una alta probabilidad de emisión de un único fotón ( $^{137}\text{Cs}$ )	Diaria
4-Linealidad energética	Evalúa la linealidad de la relación canal-energía. Se utiliza una largo semiperíodo de desintegración y con diversidad de emisiones gamma ( $^{152}\text{Eu}$ )	Diaria
5-Eficiencia de detección	Determina la eficiencia de detección para un radionúclido de largo semiperíodo de desintegración y con una alta probabilidad de emisión de un único fotón ( $^{137}\text{Cs}$ )	Mensual
6-Linealidad energética, utilizando varios radionúclidos ( $^{137}\text{Cs}$ , $^{152}\text{Eu}$ y $^{133}\text{Ba}$ )	Evalúa la linealidad de la relación canal-energía. Se utiliza una fuente de largo semiperíodo de desintegración y con diversidad de emisiones gamma ( $^{152}\text{Eu}$ )	Trimestral

Nota: Las pruebas 2, 3, 4, 5 y 6, son realizadas bajo procedimiento semiautomático mediante el software de la sonda. La prueba 6 se realiza como adicional para un control doble de este parámetro. Al realizar las mediciones descritas en este artículo, se verificó que todos los parámetros de control de calidad se encontraran dentro de los correspondientes márgenes de tolerancia.

## Calibración canal-energía

Para esta prueba se utilizaron las fuentes tipo Rod de  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{152}\text{Eu}$ , adecuadamente calibradas y trazadas desde el National Institute Standards and Technology (NIST) de la empresa Eckert & Ziegler (Valencia, CA, EEUU) y la fuente patrón de  $^{133}\text{Ba}$

calibrada en el IRD. Se localizaron los canales de energía asociados a los fotopicos de cada isótopo y se comprobó la correcta calibración canal-energía.

## Determinación de la eficiencia del detector para la geometría de la fuente con forma de glándula tiroides de $^{133}\text{Ba}$ .

Se utilizó la fuente de  $^{133}\text{Ba}$  calibrada en el IRD de Brasil el día 30/06/09, con una actividad inicial de 30.206 Bq. La fuente está diseñada de modo que simula la forma de la glándula tiroides y está colocada dentro de un maniquí que replica las condiciones de profundidad y dispersión de la glándula en el cuello. Se determinó la eficiencia de detección para distancias fuente-detector de 17, 20, 25, 30 y 35 cm.

La región de interés dentro del espectro de energías se definió como la ventana del 40% para el fotopico de 364 keV del  $^{131}\text{I}$ ; la ventana de energía se ubica entre 287 keV y 433 keV. Se determinaron los canales asociados a estas energías, que correspondieron al 146 y al 218 respectivamente. Se realizaron 5 mediciones, con un tiempo de 5 minutos cada una.

Tabla 2. Características de la fuente  $^{133}\text{Ba}$  (patrón)

Variación en el tiempo de medición (años):	0.22
Actividad inicial (Bq):	30206
Actividad estimada por decaimiento (Bq):	29772
Actividad específica (Bq/g):	134471

El factor de calibración o eficiencia de detección se cálculo de la siguiente forma:

$$FC [\%] = \frac{cps_{\text{patrón}} - cps_{\text{fondo}}}{dps_{\text{patrón}}} \times 100 \quad (1)$$

### factor de calibración

Donde  $cps_{\text{patrón}}$  corresponde a las cuentas por segundo registradas por el sistema de detección cuando se mide la fuente de  $^{133}\text{Ba}$  patrón,  $cps_{\text{fondo}}$  corresponde a las cuentas por segundo registradas por el sistema de detección cuando se mide el fondo de radiación y  $dps_{\text{patrón}}$  corresponde a la actividad en Bq de la fuente patrón.

Descripción del cálculo de incertidumbre del factor de calibración

$$FC [\%] = \frac{A(cps)_{\text{patrón}}[\text{Medición}]}{A(dps)_{\text{patrón}}[\text{Calibrada}]} \quad (2)$$

### cálculo de incertidumbre, variable FC

$$\left(\frac{\delta FC}{FC}\right)^2 = \left(\frac{\delta A(cps)_{\text{patrón}}[\text{Medición}]}{A(cps)_{\text{patrón}}[\text{Medición}]}\right)^2 + \left(\frac{\delta A(dps)_{\text{patrón}}[\text{Calibrada}]}{A(dps)_{\text{patrón}}[\text{Calibrada}]}\right)^2 \quad (3)$$

### cálculo de incertidumbre

Donde:

$A(cps)_{\text{patrón}}[\text{Medición}]$  Corresponde a la actividad medida con la sonda de la fuente calibrada en el IRD.

$\delta A(cps)_{\text{patrón}}[\text{Medición}]$  Corresponde a la incertidumbre de la medición realizada.

$A(dps)_{\text{patrón}}[\text{Calibrada}]$  Corresponde a la actividad de la fuente calibrada en el IRD.

$\delta A(dps)_{\text{patrón}}[\text{Calibrada}]$  Corresponde a la incertidumbre de la actividad reportada por el IRD para la fuente patrón.

### Descripción del cálculo de la actividad equivalente en $^{131}\text{I}$

Se define como:

$$A_e(^{131}\text{I}) = \frac{\sum PE^{133}\text{Ba}_{in}}{\sum PE^{131}\text{I}_{in}} \times A(^{133}\text{Ba}) \quad (4)$$

### cálculo de la actividad

Donde:

$\Sigma PE^{131}I_{in}$  Corresponde a la sumatoria de los porcentajes de emisión del 131I dentro de la ventana de energía.

$\Sigma PE^{133}Ba_{in}$  Corresponde a la sumatoria de los porcentajes de emisión del 133Ba dentro de la ventana de energía.

$A(^{133}Ba)$  Corresponde a la actividad del patrón de 133Ba.

En este caso, se sumaron todas las fracciones de emisión que interesaban.

<b><sup>131</sup>I</b>	
<b>Energía</b>	<b>Probabilidad de emisión</b>
364,489	0,817
284,305	0,061
<b><sup>133</sup>Ba</b>	
<b>Energía</b>	<b>Probabilidad de emisión</b>
356,01	0,6205
302,85	0,1833
383,85	0,0894
276,39	0,0716

### Cálculo de la Actividad Mínima Detectable (MDA)

La actividad mínima detectable se estimó de la siguiente forma:

$$MDA (Bq) = (2,71 + 4,65 \times cps_{fondo}^{1/2}) \times (FC)^{-1} \quad (5)$$

**MDA**

### Cálculo de actividad e incertidumbre de la fuente incógnita

$$A(dps)[Incognita] = \frac{A(cps)[Medición]}{FC [\%]} \quad (6)$$

**incógnita**

$$\left( \frac{\delta A(dps)[Incognita]}{A(dps)[Incognita]} \right)^2 = \left( \frac{\delta A(cps)_{incognita} [Medición]}{A(cps)_{incognita} [Medición]} \right)^2 + \left( \frac{\delta FC}{FC} \right)^2 \quad (6)$$

**incertidumbre MDA**

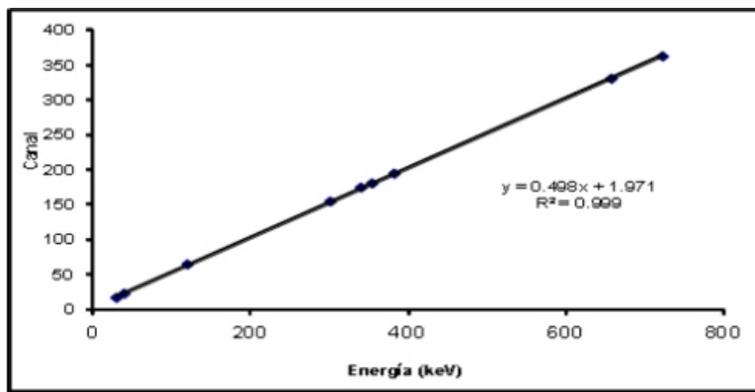
Donde:

$A(cps)_{incognita} [Medición]$  Corresponde a la medición realizada con la sonda a la fuente incógnita enviada por el IRD.

$A(dps)[Incognita]$  Corresponde a la actividad estimada de la fuente incógnita enviada por el IRD.

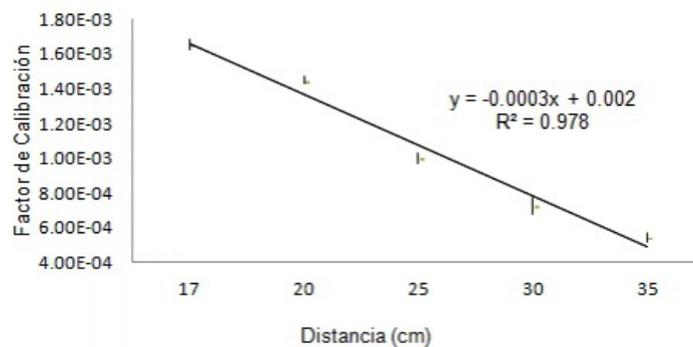
## Resultados

La primera parte de procedimiento de inter-comparación consistió en una evaluación de los parámetros de control de calidad de la sonda, de los cuales la linealidad canal-energía era el más importante. La evaluación demostró la correcta relación canal-energía del sistema; la figura 1 muestra los resultados obtenidos de esta prueba.



**Figura 1** Calibración canal-energía.

En la determinación del factor de calibración se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 2, donde se observa la dependencia con la distancia. El mejor modelo de ajuste de los datos correspondió a un ajuste lineal, lo cual se puede deber a la geometría de la fuente, por lo tanto el modelo del inverso al cuadrado no se aplica. Para efectos prácticos, el Servicio de Medicina Nuclear utiliza el valor obtenido para la distancia de 25 cm para realizar cuantificación de radionucleidos, debido a que esta es la distancia utilizada para el estudio de captación tiroidea para identificación de contaminación interna en el personal ocupacionalmente expuesto.



**Figura 2** Variación del factor de calibración (eficiencia) con la distancia fuente-detector. Incertidumbre (k=2)

Como parte de este estudio, se determinó el valor que permita (mediante la calibración de la sonda de  $^{133}\text{Ba}$ ) determinar la actividad de  $^{131}\text{I}$ , con el objetivo de utilizar la sonda para cuantificar  $^{131}\text{I}$ . El valor obtenido fue de 1.09, el cual corresponde a la fracción  $\Sigma\text{PE } ^{133}\text{Ba}_{\text{in}}/\Sigma\text{PE } ^{131}\text{I}_{\text{in}}$  de la ecuación 4. Este valor es una constante, debido a que depende únicamente de las probabilidades de emisión de los fotones en el rango de energías (287-433 keV) del  $^{133}\text{Ba}$  y  $^{131}\text{I}$ . De este modo, una actividad de 29.772 Bq de  $^{133}\text{Ba}$  es equivalente a una actividad de 32.702 Bq de  $^{131}\text{I}$ .

La tabla 4 muestra los valores obtenidos en la determinación de la actividad mínima detectable (MDA), el cual es un valor dependiente de la distancia, calculado según la ecuación 5<sup>(2)</sup>. La importancia de este valor en los procedimientos de cuantificación de un radionucleido radica en poder conocer cuál es la mínima actividad que se puede cuantificar, por debajo de la cual no es percibida por el sistema de medición. De este modo, la MDA se puede interpretar como la actividad mínima necesaria de una fuente para asegurar una razón de falso-negativo no mayor al 5% cuando el sistema está operando en un nivel crítico (punto donde se puede diferenciar entre el fondo y una actividad real)<sup>(2)</sup>.

Para lograr reducir el valor del MDA a una cierta distancia, se debe considerar explorar la variación de este parámetro con el tiempo de medición, debido a la dependencia que tiene el valor de la desviación estándar del fondo con dicho tiempo<sup>(3)</sup>.

Parametro	Medidas				
	17cm	20cm	25cm	30cm	35cm
Cuentas en el fondo	5				
Tiempo de medición (s)	300	300	300	300	300
Eficiencia	0.00163	0.00143	0.00099	0.00071	0.00054
MDA	8041.54	9166.24	13240.12	18451.57	24273.55

Los datos de la inter-comparación fueron obtenidos con una fuente incógnita suministrada por el IRD. Los valores obtenidos para las distintas distancias se muestran en la figura 3; la relación entre la actividad estimada y la actividad nominal

## Conclusiones

De este estudio se logró validar el método de calibración de la sonda de captación, con el objetivo de cuantificar la incorporación tiroidea de  $^{131}\text{I}$  en el personal ocupacionalmente expuesto del Servicio de Medicina Nuclear. Los resultados obtenidos muestran una adecuada relación entre los valores estimados y el valor nominal de la fuente incógnita. También se puede considerar como un paso siguiente, la validación de un protocolo para cuantificar la incorporación de  $^{131}\text{I}$  mediante el uso de una gammacámara<sup>(5)</sup>.

La determinación del Factor de Calibración cuenta como un parámetro nuevo de control de calidad de la sonda, que dentro del Servicio de Medicina Nuclear se decidió realizar con una periodicidad semestral, con el objetivo de evaluar la constancia de la medición y con esto determinar el estado del sistema de medición.

Como estudio adicional, se puede considerar a futuro realizar un estudio de la dependencia del MDA con el tiempo de la medición, lo cual permitiría establecer el tiempo óptimo para la distancia de 25 cm utilizada habitualmente para cuantificar la incorporación tiroidea de  $^{131}\text{I}$ .

## Referencias

01. International Atomic Energy Agency. International Basic Safety Standards for Protection Against Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No 115. Vienna, 1996.
02. Knoll, G. Radiation Detection and Measurement. 3er edición. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos, 2000.
03. Dantas B, Vidal MSV, Dantas BM. A methodology for auto-monitoring of internal contamination by  $^{131}\text{I}$  in nuclear medicine workers. Radiation Protection Dosimetry 2007; 127:483-7.
04. Dantas B, Rojo AM, López G, et al. Dosimetría interna en la región de América Latina y Caribe - capacidades instrumentales y recursos humanos. Memorias 1er Congreso Latinoamericano del IRPA, Medellín, Colombia, 2010.
05. Dantas BM, Lucena EA, Dantas AL, et al. A protocol for the calibration of gamma cameras to estimate internal contamination in emergency situations. Radiation Protection Dosimetry 2007; 127:253-7.