

IMPLEMENTACION DE UN PROGRAMA DE MONITOREO POR INCORPORACION DE MATERIAL RADIACTIVO EN MEDICINA NUCLEAR

IMPLEMENTATION OF A MONITORING PROGRAM FOR INCORPORATION OF RADIOACTIVE MATERIAL IN NUCLEAR MEDICINE

MARÍA LUISA IDOYAGA NAVARRO¹, JORGE A. PUERTA ORTIZ², RICHARD FLORENTÍN¹

¹Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Campus Universitario, San Lorenzo, Paraguay. Email: mlidoyaga@gmail.com

²Universidad Nacional de Medellín, Colombia. Email: japuerta@unal.edu.co

Resumen: Se ha identificado al yodo 131 (I^{131}) como uno de los radionucleidos de mayor potencialidad de exposición interna significativa durante los procedimientos de fraccionamiento y/o administración de dosis terapéuticas y diagnósticas en medicina nuclear, debido a su alta radiotoxicidad y alta volatilidad a temperatura ambiente (E. Rodríguez, 2010). Por lo tanto es de interés implementar el sistema de Monitoreo por incorporación de materiales radiactivos en aquellos lugares donde se realicen tareas de manipulación de fuentes abiertas que permita la evaluación de la protección radiológica de los trabajadores ocupacionalmente Expuestos (TOEs). En este trabajo se presenta una propuesta de Monitoreo ocupacional de la exposición interna, no aplicado en Paraguay. Se tomó como referencia, un Centro de Medicina Nuclear y las mediciones se realizaron por dos métodos: **a) In Vitro:** Se tomaron muestras de Orina cada 15 días de los TOEs. Se adecuó un método de detección de I^{131} emisor gamma en la orina, mediante la técnica de espectrometría gamma, con un detector de Ioduro de Sodio Activado con Talio NaI(Tl) previamente calibrado por energía y eficiencia utilizando una fuente patrón de I^{131} , preparado con 1 μ Ci de I^{131} mezclado con 400 ml de agua destilada. **b) In Vivo:** Al TOE que en las mediciones In Vitro registraba mayor concentración de actividad del I^{131} se le realizó la medición directa en Tiroides. Se utilizó un Sistema de Espectrometría Gamma, multicanal, con Detector de NaI (Ioduro de Sodio), CAPTUS 3000 (Thyroid uptake system, 2009). También se estimó con estos dos métodos el valor de la Dosis Efectiva Comprometida.

Palabras Claves: Radiactivo, Radiotoxicidad, Dosis, Medicina Nuclear, Monitoreo, exposición interna, in vitro, in vivo.

Abstract: Has been identified to iodine radionuclides I^{131} , as one of the greatest potential for significant internal exposure during fractionation procedures and or administration of therapeutic doses and diagnostic nuclear medicine due to its high radiotoxicity and high volatility at room temperature (E. Rodríguez, 2010). Therefore it is of interest to implement the monitoring system by incorporation of radioactive materials in areas where handling tasks are carried out open source to allow assessment of the radiation protection of occupationally exposed workers (TOES). This paper presents a simple proposal and concrete operational monitoring occupational internal exposure that can be applied to the Nuclear Medicine Centers. Especially focused on the evaluation of the measurements that are made in monitoring programs because of incorporation of radioactive material in the field of nuclear medicine. It was taken as reference, a Nuclear Medicine Center and the measurements were performed by two methods: **a) In Vitro:** Urine samples were taken every 15 days of the TOEs. It was adapted from a method of detecting gamma emitter I^{131} in urine, which is detected by radiometric analysis of a sample using gamma spectrometry technique, with a detector sodium iodide thallium-activated NaI (TI) of size 3.8 x3.08 cm, that detector which was previously calibrated energy and efficiency using a pattern source I^{131} was prepared with 1 μ Ci of I^{131} mixed with 400 ml of distilled water. **b) In Vivo:** The TOE than in vitro measurements recorded higher concentration of I^{131} activity was performed at Thyroid direct measurement. Screening for thyroid use a Gamma Spectrometry System, multichannel, NaI detector (sodium iodide), CAPTUS 3000 (Thyroid uptake system). It was also estimated with these methods the value of the committed effective dose, using the software AIDE. With these results, the country, through the Regulatory Authorities could implement properly internal monitoring system to the TOEs.

Key Words: Radioactive, Radiotoxicity, Dose, Nuclear Medicine, Monitoring, internal exposure, in vitro, in vivo.

INTRODUCCIÓN

La Norma Básica de Seguridad del Organismo Internacional de Energía Atómica (Colección de Seguridad N°: 115, 1997) expresa: “A los efectos de demostrar el cumplimiento de los límites de dosis, deberá ser de aplicación la suma de la dosis equivalente personal causada por exposición externa a radiación penetrante en el período especificado, y de la dosis equivalente comprometida o la dosis efectiva comprometida, según corresponda, causada por incorporaciones de sustancias radiactivas en el mismo período”.

Los Trabajadores Ocupacionalmente Expuestos (TOEs) que trabajan en Clínicas de Medicina Nuclear, tienen durante la manipulación, dosificación y administración de los radiofármacos, el riesgo de irradiación externa parcial o total del cuerpo y el riesgo de incorporar materiales radiactivos.

En Paraguay, en la última década se ha incrementado en calidad y cantidad el número de procedimientos empleados en Medicina Nuclear. Para fines de diagnóstico las Técnicas más utilizadas en Paraguay son: el empleo de trazadores como el Tc^{99m} , I^{131} y Ga^{67} . Para fines Terapéuticos se utiliza el I^{131} en el tratamiento del cáncer de tiroides e hipertiroidismo. En las prácticas de Medicina Nuclear, el uso de estos isótopos radiactivos representan un riesgo radiológico para los TOEs, tales como: Exposición por irradiación externa a cuerpo entero, exposición por radiación externa en forma localizada, en particular exposición de manos y piel, riesgo de contaminación interna debido a incorporación de material radiactivo durante el fraccionamiento y administración de radiofármacos, por vía de inhalación e ingestión.

Por tanto es necesario implementar un Programa de Monitoreo que incluya el Monitoreo de Dosimetría Interna considerando que la vía principal de incorporación es la inhalación e ingestión. Este programa debe verificar que se satisfagan los límites de dosis para trabajadores ocupacionalmente expuestos (ICRP Publicación 103, 2007) y comprenderá la Vigilancia Radiológica de las dosis ocupacionales debido a incorporación de material radiactivo, el cual puede realizarse a través de me-

didias In Vitro o In Vivo.

En este trabajo se presenta, un programa piloto para la vigilancia y evaluación de las dosis ocupacionales debido a incorporación del I^{131} . El I^{131} tiene una vida media de 8 días y emite un espectro de rayos β (Beta) y γ (gamma), con un gamma dominante de 364 KeV, las emisiones Beta contribuyen en gran medida a la dosis de radiación de la tiroides de quien lo incorpora.

Por lo expuesto este trabajo pretende demostrar que es factible implementar un Programa de Monitoreo con Dosimetría Interna mediante mediciones In Vivo y mediciones In Vitro.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo fue realizado con un enfoque cuantitativo, de corte transversal y no experimental, el cual se desarrolló en un Centro de Medicina Nuclear, que posee 3 (tres) TOEs (dos Técnicos y un Médico especialista en medicina nuclear), quienes proporcionaron las muestras de orina, cada 15 días por un periodo de 5 (cinco) meses (agosto a diciembre), tiempo en que fue realizada las mediciones de concentración de radionucleidos en orina (mediciones in Vitro), además se han hecho Monitoreo Especial, mediciones In Vivo a un Técnico que reportaba mayor concentración de radionucleidos en orina. El laboratorio donde se realizaron las mediciones tanto In Vivo como In Vitro fue el Laboratorio de Espectrometría Gamma de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) de la Dirección General de Investigación Científica y Tecnológica (DGICT) de la Universidad Nacional de Asunción (UNA).

Métodos de Medición

Las mediciones fueron realizadas por espectrometría gamma. Para realizar las mencionadas mediciones consideramos el tipo de radionucleido, las vías de incorporación y la biocinética del radiofármaco, como así también cuestiones administrativas, como frecuencia de medición y disponibilidad del Laboratorio. Del análisis de los factores anteriores decidimos utilizar dos métodos de medición:

- **Métodos Indirectos de Medición (*In Vitro*):** Medida de la Concentración de Radionucleidos en muestra biológica, específicamente Orina.
- **Métodos Directos de Medición (*In Vivo*):** Medida de la Concentración de Radionucleidos en órgano del cuerpo, específicamente la Tiroides.

Monitoreo *In Vitro*

Para determinar la dosis interna recibida por los TOEs, se midió la concentración de I^{131} incorporado por los TOEs, mediante los protocolos basados en la ICRP 78 (1997), los cuales recomiendan determinar la concentración de actividad en una muestra de orina, en unidades (Bq/l), utilizamos el sistema espectrométrico (NaI(Tl)) calibrando los canales en energía determinando la eficiencia de detección, el fondo de radiación y la actividad mínima detectable (AMD).

De esta manera para medir la concentración de I^{131} en la muestra de orina, se asumió lo siguiente:

- Eliminación nominal diaria de 1,4 litros para hombre
- La orina contiene sustancias de desechos y otros materiales
- La eliminación de la orina depende de condiciones fisiológicas y ambientales
- La recolección de la muestra, la primera orina de la mañana.
- La vigilancia rutinaria quincenal

Se estableció una vigilancia rutinaria quincenal, suponiendo una incorporación a la mitad del periodo, 7 (siete) días, las mediciones se realizaron en un laxo de 5 meses (agosto a diciembre). Las muestras de orina fueron colocadas, en contacto con el detector de Ioduro de Sodio. Cada una de las mediciones fueron interpretadas como mediciones simples. El análisis de la muestra con el espectrómetro se realizó en un tiempo de 900 (s). Con los datos obtenidos se calculó la concentración de actividad de las muestras de orina y la Incertidumbre.

Equipos y Materiales Utilizados

Se utilizó un Detector de Centelleo de Ioduro de Sodio activado con Talio NaI(Tl), de (3x3) pulgadas marca BICRON, dentro de un blindaje en forma de anillo de hierro para evitar las lectura de radiaciones externa que no sea la de la muestra (Fig.1), incorporado a una PC con tarjeta multicanal y un software de espectroscopia GENIE 2000 CANBERRA, fuentes de calibración de Cs^{137} y Ba^{133} , material de referencia I^{131} (Patrón de Calibración), patrón para calibración de fondo de radiación, muestras de orina, ácido nítrico al 65 %, agua destilada y materiales de laboratorio (frascos de plástico de 400 ml para toma de muestra, probeta graduada de 50 ml, bolsas de plástico, papel absorbente, guantes de goma y tapa boca).



Figura 1. Sistema de Espectrometría Gamma, Mediciones In Vitro (Laboratorio CNEA- UNA).

Calibración del Sistema Espectrométrico

Se calibro el sistema espectrométrico (multicanal) para asignar las energías a cada canal en el rango de energía correspondiente al fotopico del I^{131} . Se usaron 2 fuentes radiactivas de calibración (Fig. 2): una de Cesio 137 (Cs^{137}) de energía 661,7 keV, y una de Bario 133 (Ba^{133}) de energía 356 keV, así que entre estas dos energías se encuentra el fotopico de I^{131} .

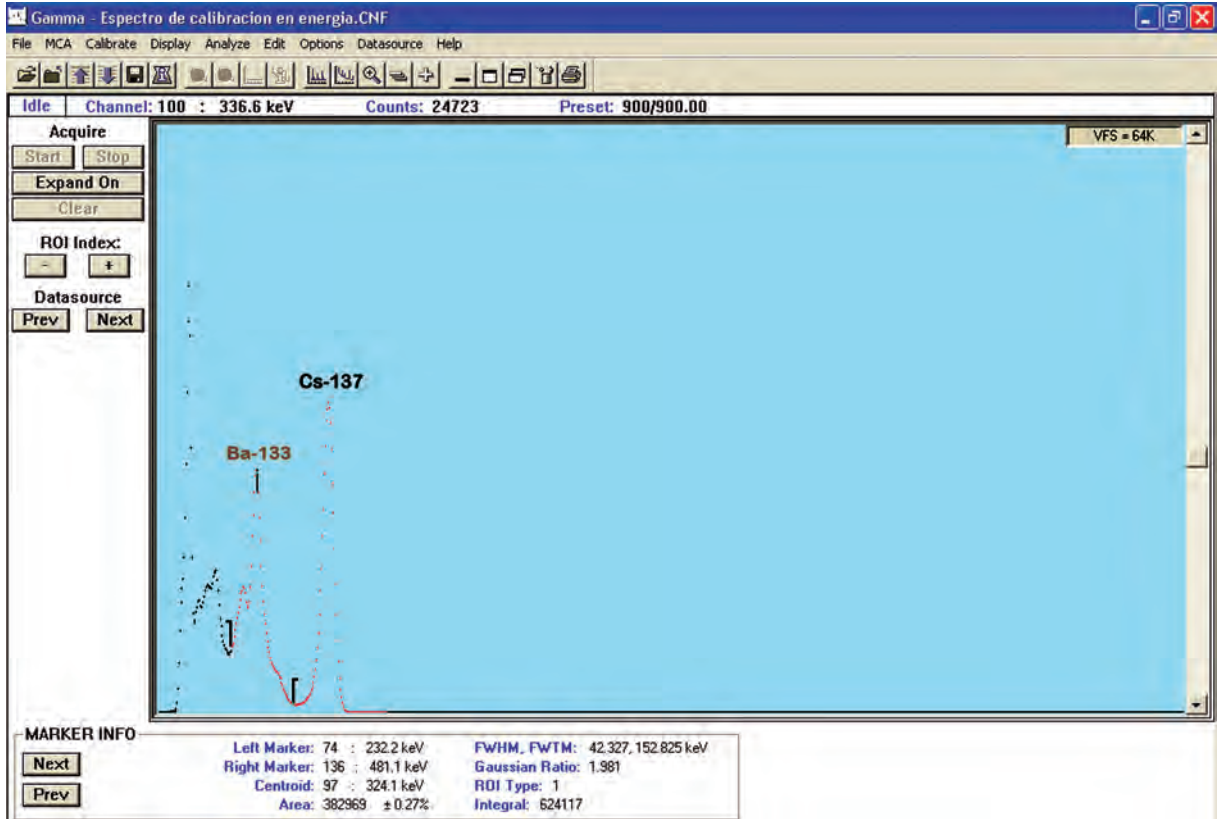


Figura 2. Espectro de Calibración en Energía del Ba133 (356 keV) y Cs137 (661,7 keV).

Cálculo de la Eficiencia de detección del Sistema de Medición y su Incertidumbre

Se utilizaron patrones de referencias, correspondientes a las geometrías de medición empleadas y los intervalos energéticos de interés, preparados a partir de una solución. La composición de esta solución de laboratorio se aproxima a la densidad de la matriz de la muestra que será analizada.

El patrón de referencia fue preparado con 1 µCi de I¹³¹, calibrado con el Activímetro marca Carpintec, modelo CRC-6 del Centro de Medicina Nuclear. Para la preparación del Patrón de referencia se utilizó un recipiente plástico con tapa de 400 ml, se impregno las paredes interiores del recipiente con ácido nítrico al 65 % para evitar que el material radiactivo se adhiera a las paredes del recipiente y el tiempo de medición en el sistema espectrométrico fue de 900 segundos (15 min). Para medir la radiación de Fondo se utilizó como blanco el agua destilada.

Para el cálculo la Eficiencia de Detección del sistema de medición y su incertidumbre se utilizaron las siguientes formulas (PROYECTO RLA/5/048 ARCAL LXXIX, 2005):

$$Ef = \frac{T_{cpf} - T_{cf}}{Ap \times \gamma} \quad (1)$$

$$T_{cpf} = \frac{AIP}{t_m} \quad (2)$$

$$T_{cf} = \frac{AIF}{t_m} \quad (3)$$

$$U_{Ef} = \frac{K}{Ap\gamma} \sqrt{(T_{cpf} - T_{cf})^2 \left[\frac{U^2 Ap}{Ap^2} + \frac{U^2 \gamma}{\gamma^2} \right]} \quad (4),$$

donde:

t_m : Tiempo de medición.

T_{cpf} : Tasa de conteos del patrón más el fondo en el fotopico del I^{131} [cps].

T_{cf} : Tasa de conteos del fondo en la región correspondiente al fotopico del I^{131} [cps].

A_p : Actividad del patrón, correspondiente al I^{131} [Bq].

γ : Probabilidad de emisión del Fotón gamma para la energía correspondiente del I^{131} .

AIP : Área integral del patrón.

AIF : Área integral de fondo.

U_{Ap} : Incertidumbre de la actividad del patrón, correspondiente al I^{131} [Bq].

U_{γ} : Incertidumbre de la probabilidad de emisión del fotón gamma para la energía correspondiente del I^{131} .

k : Factor de cobertura.

U_{E_f} : Incertidumbre de la eficiencia del detector.

U_{AMD} : Incertidumbre de la actividad mínima detectable.

E_f : Eficiencia de detección para la energía correspondiente del I^{131}

T_{cf} : Tasa de conteos del fondo en la región correspondiente al fotopico del I^{131} [cps], el mismo fondo anterior

V : Volumen de la muestra [ml].

γ : Probabilidad de emisión del Fotón gamma para la energía correspondiente del I^{131}

t_m : Tiempo de medición

AIO : Área integral Orina

U_c : Incertidumbre de la Concentración

Métodos de Cálculo

El valor de la concentración de actividad, multiplicada por el valor estándar de eliminación nominal diaria que es 1,4 litros para el hombre da el valor de la actividad en orina eliminada en 24 hs. Para calcular la Incorporación I (Bq), se considera que se produjo la incorporación 7 días antes. En la (ICRP 78, 1997) se halla en una tabla el factor correspondiente para los 7 días, la actividad en orina eliminada en 24 horas se divide por este factor y se tiene la cantidad incorporada I (Bq). La Dosis Efectiva Comprometida se calcula con la formula

$$E(50) = I(Bq) \times e(50) \quad (8)$$

donde $e(50)$ es el coeficiente de dosis efectiva comprometida para inhalación

Si el valor de la concentración de actividad de los TOEs resulta muy superior a la Actividad Mínima de Detección, se le realiza la medición In Vivo con el Detector de Tiroides.

Manejo de las Muestras de Orina

Para las mediciones indirectas por espectrometría gamma de las muestras de orina recolectadas de los TOEs del Centro de Medicina Nuclear en estudio, las muestras fueron manejadas de la siguiente manera (Proyecto RLA/5/048, 2005):

- La recolección de la muestra se realizó en frascos plásticos con tapa de 400 ml, acorde con la geometría del detector y provisto de un rotulo de identificación de cada TOE,

Medida de la Concentración de Actividad en Muestras de Orina

La concentración de actividad en la muestra y su incertidumbre, se calculó con las siguientes formulas (PROYECTO RLA/5/048 ARCAL LXXIX, 2005):

$$C = \frac{T_{cmf} - T_{cf}}{E_f \cdot \gamma \cdot V} \quad (5)$$

$$T_{cmf} = \frac{AIO}{t_m} \quad (6)$$

$$U_c = \frac{K}{E_f \cdot \gamma \cdot V} \sqrt{(T_{cmf} - T_{cf})^2 \left[\frac{U_{E_f}^2}{E_f^2} + \frac{U_v^2}{V^2} + \frac{U_{\gamma}^2}{\gamma^2} \right]} \quad (7)$$

donde:

T_{cmf} : Tasa de conteo de la muestra más el fondo en el foto pico correspondiente al I^{131} [cps]

colocados en una bolsa plástica.

- Se tomó la primera micción del día.
- En el Laboratorio para la medición, estas muestras fueron trasladadas en otro frasco de las mismas características a modo de evitar la contaminación radiactiva que podría tener el frasco entregado por los TOEs.
- A las muestras de orina, se le realizó un ajuste volumétrico con agua destilada y de esa forma se obtenía el volumen de la orina, medida con una probeta graduada.

Monitoreo *In Vivo* (Tiroides)

La determinación de la concentración de radionúclidos en órganos se realizó mediante la medición directa en las Tiroides, con un sistema de Espectrometría Gamma, multicanal con Detector de NaI (Ioduro de Sodio), Marca CAPTUS 3000 (Thyroid Uptake System).



Figura 3. Fuente de Cesio 137 en el detector.

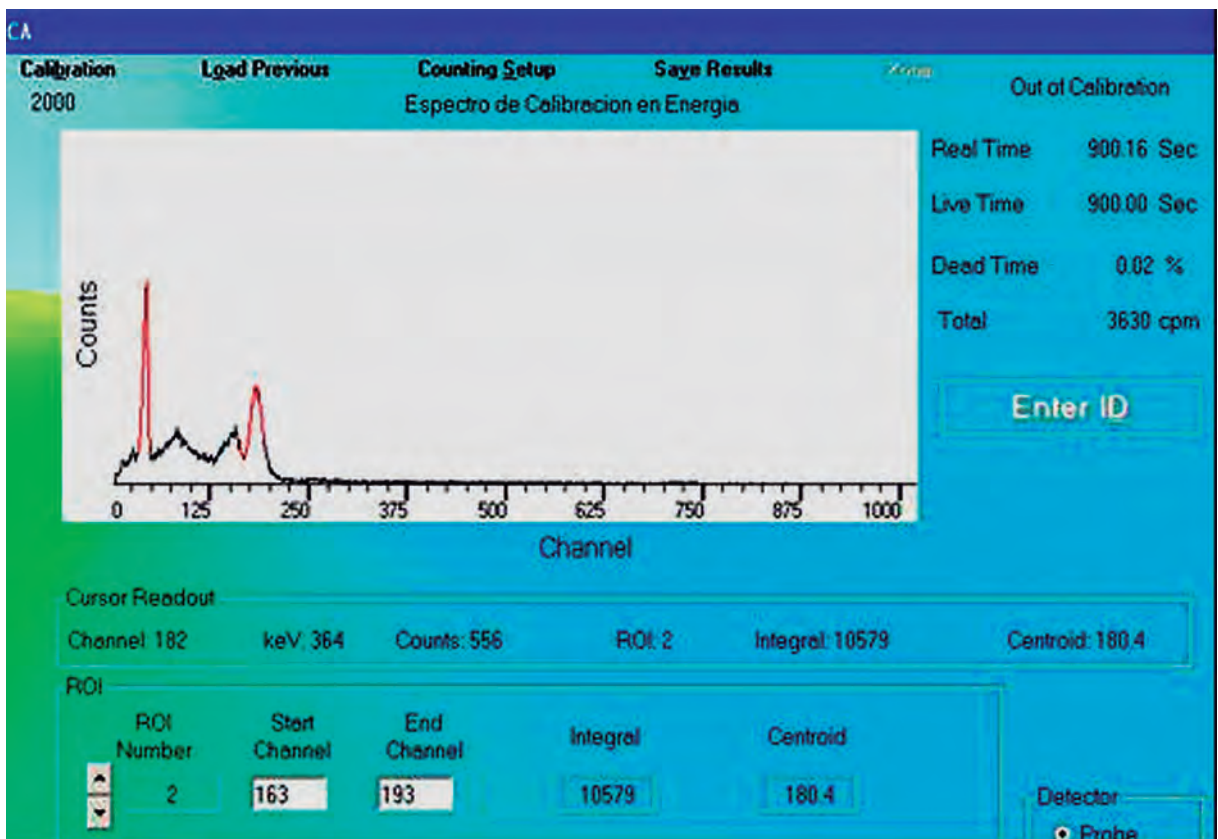


Figura 4: Espectro de Calibración en Energía.

El sistema se calibra con una fuente de calibración de Cs¹³⁷ de 1.015 µCi de actividad, una fuente de Eu¹⁵² de 500 nCi de actividad y una Fuente de Ba¹³³ (Fantoma Antropomórfico de Tiroides simulador del I¹³¹) de actividad 0,928 µCi. El procedimiento de calibración del sistema de medición se realizó de acuerdo a lo especificado en el manual de procedimiento del sistema de captación tiroidea del fabricante del equipo Carpintec Inc. CAPTUS 3000.

Calibración en Energía

Para la calibración en energía del sistema se utilizó una fuente de Cs¹³⁷ colocado en la sonda del detector (Fig.3), obteniéndose el espectro (Fig.4) que es guardado automáticamente en el sistema. Luego se coloca la fuente de Eu¹⁵² para lo cual se sigue los pasos del Protocolo CAPTUS 3000.

Calibración en Eficiencia

Se calibra con la fuente patrón de Ba¹³³, (Fantoma Antropomórfico de Tiroides), (Fig.5) conteniendo una fuente con actividad certificada utilizada como referencia, y otro Fantoma que contiene una fuente líquida patrón de Ba¹³³ (simulador del I¹³¹) de 0,928 µCi, (PROYECTO RLA 9066 - OIEA, Laboratorio IRD-CNEN-BRASIL, 2010)

Para tener la calibración para el I¹³¹, se ubica la ventana del multicanal en el fotopico del isótopo Ba¹³³, se referencia en el sistema de detección la actividad de la fuente que es de 0,928 µCi, la fecha

de calibración y el tiempo de 900 segundos, luego se saca la fuente, y se mide el fondo de radiación y con estos datos se calcula la eficiencia con la siguiente ecuación.

$$E_f = \frac{cps}{A_p \gamma} \quad (9)$$

donde:

- cps*: Actividad medida (área integral)
- t*: tiempo de medición
- A_p*: Actividad actual de la fuente patrón
- γ*: Probabilidad de emisividad gamma de la fuente

Medidas de la Incorporación en Tiroides

Se le coloca al TOE en la camilla (Fig.6), ubicando el detector en el cuello del TOE. En el multicanal (MCA), se coloca el tiempo de medición de 900 s, se marca la región de interés, para la energía del I¹³¹ y se obtiene la integral de conteo y con este dato se calcula la concentración de Actividad de I¹³¹ incorporada en tiroides por el TOE con la ecuación

$$M(t) = \frac{cps}{t E_f \gamma} \quad (10)$$

donde



Figura 5. Calibración con Fuente de Ba¹³³.



Figura 6. Monitoreo Especial-Medición de Tiroides del TOE2.

- cps : Integral de cuentas
- t : Tiempo de medición
- E_f : Eficiencia
- γ : Probabilidad de emisión gamma

Calculo del Equivalente de Dosis E(50)

Con los datos obtenidos en el Monitoreo In Vitro e In Vivo, se realizan los cálculos con el SOFTWARE AIDE (Bertelli *et al.*, 2008) se determina la relación R entre la concentración de actividad incorporada en orina ($M_{orina24hs}$) y la concentración de actividad incorporada en tiroides ($M_{Tiroides}$)

$$R = \frac{M_{orina24hs}}{M_{Tiroides}} \quad (11)$$

Este valor de R se verifica en la tabla de Fracción de Retención y Excreción (orina/tiroides) [ICRP 78, 1997] para ver la actividad correlacionada con el día después de la incorporación, además se obtienen las fracciones que corresponde a orina y tiroides, con estos valores se calcula la Incorporación en Orina y en Tiroides, según:

$$I_{orina}(A_{orina}) = \frac{A_{orina}}{fraccion_{Orina}}(Bq) \quad (12)$$

$$I_{tiroides}(M_{tiroides}) = \frac{M_{Tiroides}}{fraccion_{Tiroides}}(Bq) \quad (13)$$

Tabla 1. Concentración de Actividad de I^{131} en la muestra de Orina y su Incertidumbre. NM: No medido.

TOE	FECHA	C (Bq/l)	UC (Bq/l)	Concentración de Actividad y su incertidumbre (Bq/l)
1	16/08/11	0,374	0,08	0,374 ± 0,08
2		464,54	113,07	464,54 ± 113,07
3		0,624	0,35	0,624 ± 0,35
1	30/08/11	10,15	2,40	10,15 ± 2,40
2		55,02	13,39	55,02 ± 13,39
3		- 24,67	6,83	-24,67 ± 6,83
1	13/09/11	- 19,87	6,24	-19,87 ± 6,24
2		-24,23	13,19	-24,23 ± 13,19
3		- 51,96	39,44	-51,96 ± 39,44
1	27/09/11	NM	NM	NM
2		73,82	15,74	73,82 ± 15,74
3		71,93	15,36	71,93 ± 15,36
1	11/10/11	3,38	0,94	3,38 ± 0,94
2		32,59	17,33	32,59 ± 17,33
3		9,53	5,0	9,53 ± 5,0
1	25/10/11	19,49	3,02	19,49 ± 3,02
2		776,42	465,29	776,42 ± 465,29
3		192,27	80,87	192,27 ± 80,87
1	08/11/11	49,90	21,58	49,90 ± 21,58
2		9230,5	3715,2	9230,5 ± 3715,2
3		170,72	50,39	170,72 ± 50,39
1	22/11/11	25,432	1,172	25,432 ± 1,172
2		1215,59	354,195	1215,59 ± 354,192
3		21,26	9,63	21,26 ± 9,63
1	20/12/11	- 12,34	2,972	-12,34 ± 2,972
2		310	124,8	310 ± 124,8
3		42,12	15,93	42,12 ± 15,93

Con la medida anterior al monitoreo especial se calcularon las incorporaciones de orina y tiroides, utilizándose la incorporación en tiroides, por tener menos incertidumbre, para determinar el coeficiente de dosis e(50) (ICRP 78, 1997) correspondiente a inhalación tipo F, y con este valor se calcula el equivalente de dosis E(50).

$$E(50) = I_{tiroides} \times e(50) \quad (14)$$

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Cálculo de la Eficiencia de Detección y la Actividad Mínima Detectable con sus Incertidumbres

El cálculo de la Eficiencia de Detección y la Actividad mínima detectable con sus incertidumbres reportó los siguientes valores:

$$E_f = 0,218 \pm 0,021 \quad AMD(Bq/l) = 3,4 \pm 0,58$$

Los valores de concentración de Actividad de I^{131} en la muestra de Orina y su Incertidumbre pueden apreciarse en la Tabla 1.

Monitoreo In Vitro de la Incorporación de I^{131} en orina de los TOEs

La Tabla 2 nos muestra los valores obtenidos de las mediciones de muestras de orina que corresponden a medidas rutinarias de los TOEs (1 y 3). Sumando

Tabla 2. Valores obtenidos en el Monitoreo *In Vitro* de los TOEs 1 y 3.

	FECHA	A _{ORINA 24 hs}	I(Bq)	E(50) Sv
TOE 1	16/08/2011	0,524	4990,5	5,48955E-05
	30/08/2011	14,21	135333,33	0,001488667
	13/09/2011	< AMD	< AMD	< AMD
	11/10/2011	4,73	45047,62	0,000495524
	25/10/2011	27,29	259904,76	0,002858952
	08/11/2011	70	666666,667	0,007333333
	22/11/2011	35,6	339047,619	0,003729524
	06/12/2011	4,321	41066,67	0,0000452
	< AMD = Menor a la Actividad Mínima Detectable			Σ E(50) = 0,01595 Sv Σ E(50) = 15,95 mSv
	FECHA	A _{ORINA 24 HS}	I(Bq)	E(50) Sv
TOE 2	16/08/2011	0,874	8323,80952	9,15619E-05
	30/08/2011	< AMD	< AMD	< AMD
	13/09/2011	< AMD	< AMD	< AMD
	27/09/2011	109,94	1047047,62	0,011517524
	11/10/2011	13,36	127238,095	0,001399619
	25/10/2011	269,18	2563600	0,0281996
	08/11/2011	239,008	2276266,67	0,025038933
	22/11/2011	29,76	283466,67	0,003118133
	06/12/2011	11,564	110133,33	0,001211467
	20/12/2011	58,968	561600	0,0061776
	< AMD = Menor que la Actividad Mínima Detectable			Σ E(50) = 0,076663 Sv Σ E(50) = 76,663mSv

toda la dosis recibida durante los cinco meses de Monitoreo se observa que hubo incorporación de I^{131} superando los niveles de Investigación de 6 mSv/año. El TOE1 presenta una dosis efectiva comprometida **E (50) de 15,95 mSv**, y el TOE 3 una dosis efectiva comprometida **E (50) de 76,663 mSv**.

La Tabla 3 nos muestra los valores obtenidos de las mediciones de muestras de orina que corresponden únicamente a medidas rutinarias del TOE 2. Sumando toda la dosis recibida durante los 5 meses de Monitoreo se observa, que hubo incorporación importante de I^{131} superando los niveles de Investigación de 6 mSv/año. El TOE 2 presenta una dosis efectiva comprometida **E (50) de 1718,4426 mSv**.

Un análisis de los factores que introducen incertidumbres del tipo A, las cuales no podemos cuantificar como día de incorporación y las incertidumbres tipo B cuantificadas mediante las ecuaciones 4 y 9, que involucran actividad medida y dosis reportada, demuestran que la estimación de la dosis efectiva comprometida es muy elevada.

Además el elevado valor de la dosis efectiva del TOE 2 se corresponde con la mayor similitud del pico observado en la muestra con el pico de

Tabla 3. Valores obtenidos en el Monitoreo *In Vitro* del TOE 2.

MONITOREO IN VITRO – ORINA				
	FECHA	A _{ORINA 24 HS}	I(Bq)	E(50) Sv
TOE 2	16/08/2011	650,36	6193904,76	0,068132952
	30/08/2011	77,07	734000	0,008074
	13/09/2011	< AMD	< AMD	< AMD
	27/09/2011	103,34	984190,476	0,010826095
	11/10/2011	45,64	434666,667	0,004781333
	25/10/2011	1085,99	10342761,9	0,113770381
	08/11/2011	12941	123247619	1,35572381
	22/11/2011	1701,83	16207904,8	0,178286952
	06/12/2011	14,112	134400	0,00148
	20/12/2011	434	4133333,33	0,0455
	< AMD = Menor que la Actividad Mínima Detectable			Σ E (50) = 1,718442571Sv Σ E (50) = 1718,4426mSv

Tabla 4. Resultados del Monitoreo Especial del TOE 2.

MONITOREO IN VIVO – TIROIDES			
FECHA	M _{TIROIDES} (Bq)	I (Bq)	E(50) Sv
28/09/11	7139,94	72339,817	0,00079574
30/09/11	8528,029	78963,2315	0,000868
09/11/11	5386	45260,5	0,00049787
23/11/11	13187,2705	110810,6	0,00121892
			$\Sigma E(50) = 3,38 \times 10^{-3}$ $Sv = 3,38$ mSv

MONITOREO IN VITRO - ORINA			
FECHA	A _{ORINA 24 HS} (Bq)	I(Bq)	E(50) Sv
28/09/11	11,2	106666,66	0,0011733
30/09/11	326,58	238379,562	0,002622
09/11/11	1797,8	17121905	0,188
23/11/11	2577,4	24546666,7	0,270
			$\Sigma E(50) = 0,462$ $Sv = 462$ mSv

I^{131} , que los demás picos observados en las demás muestras de los otros TOEs; con lo que se concluye que el TOE 2 tuvo una incorporación mayor del radioisótopo de interés.

Monitoreo Especial (In Vivo e In Vitro) de la Incorporación de I^{131} en Tiroides y Orina del TOE 2

Debido a los valores elevados de Dosis efectivas Comprometidas para el TOE 2 se procedió al Monitoreo Especial con lo cual los valores de dosis obtenidos son menores.

Tabla 5. Cálculo de Ratio, que es la relación de las fracciones de tiroides/orina, y de Ratio AIDE, que es la relación teórica.

Ratio	Día	Ratio AIDE	Orina 24 hs	Tiroides
637,5	4	671,11	1,47E-04	9,87E-02
26,1	2	5,14	2,31E-02	1,19E-01
3,0	2	5,14	2,31E-02	1,19E-01
51,2	3	78,91	1,38E-03	1,09E-01

Tabla 6. Cálculos realizados con el programa AIDE para el TOE 2.

I (Bq) Tiroides	I (Bq) Orina	E (50) Orina	E (50) Tiroides
7,23E+04	7,61E+04	7,96E-04	8,38E-04
7,18E+04	1,41E+04	7,90E-04	1,55E-04
4,53E+04	7,78E+04	4,99E-04	8,56E-04
1,22E+06	1,87E+06	1,34E-02	2,06E-02
		$\Sigma E(50) = 0,01545$ $Sv = 15,45$ mSv	$\Sigma E(50) = 0,02247$ $Sv = 22,47$ mSv

La Tabla 4 nos muestra los valores obtenidos del Monitoreo In Vivo e In Vitro, observándose que el TOE 2 presenta una dosis efectiva comprometida (50 años) total en el Monitoreo In Vivo de **3,38 mSv** y en el Monitoreo In Vitro de **452 mSv**. Utilizando el Programa AIDE y relacionando Tiroides/Orina u Orina/Tiroides (Tabla 5), comparada con la relación teórica, que más se ajuste al día de incorporación, para el periodo de Monitoreo Especial, utilizando los datos de la Tabla 4, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 6.

Asumimos el valor **E(50) Tiroides 22,47 ± 6,7 mSv**, con este resultado se puede concluir que en esta prueba metodológica mediante los análisis realizados se demuestra la capacidad para implementar un Programa de Monitoreo de Incorporación Interna extensible a cualquier Centro de Medicina Nuclear, mejorándose los cálculos de incertidumbre de modo a aumentar la certeza en las dosis reportada por el método.

AGRADECIMIENTOS

A las Instituciones que hicieron posible la realización de este Trabajo Científico: Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Centro de Diagnóstico y Tratamiento Nuclear (CEDIN). Al Prof. MSc. PhD Jorge Anselmo Puerta, que a pesar de la distancia, me ha transmitido sus conocimientos y experiencias. Al Prof. Dr. Jorge Antonio Jara Yorg, por permitirme utilizar su Centro de Medicina Nuclear y sus trabajadores ocupacionalmente expuestos Miguel y Andrés.

BIBLIOGRAFIA

- Bertelli, L., D. R. Melo, J. Lipsztein & R. Cruz-Suarez. 2008. AIDE: Internal Dosimetry Software Radiation Protection Dosimetry, 130(3): 358–367.
- Captus®3000. 2009. Thyroid Uptake System Owner's Manual. Capintec, Inc, Pittsburgh, PA 15238.
- Colección de Seguridad. 1997. Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección contra la Radiación Ionizante y para la Seguridad de las Fuentes de Radiación, OIEA, Viena. Colección de Seguridad 115.
- Decreto del Poder Ejecutivo. 2000. Decreto 10.754, Reglamento Nacional de Seguridad para la Protección contra las Radiaciones Ionizantes y para la Seguridad de las Fuentes de Radiación, Rca. Del Paraguay.
- International Commission on Radiological Protection. 1994. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclide by Worker, Annals of the ICRP 24(4), Elsevier Science Ltd., Oxford. ICRP Publication 68.
- International Commission on Radiological Protection. 1997. Individual monitoring for internal exposure of workers, Pergamon Press, New York. (ICRP) Publication 78.
- International Commission on Radiological Protection. 2007. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon, New York. ICRP Publication 103.
- Proyecto RLA/5/048 2005. Armonización Regional de los Requisitos Técnicos y específicos de Calidad para el Control de la Contaminación Radiactiva de Alimentos, Versión 1.0, Viena. ARCAL LXXIX.
- Proyecto RLA 9066. 2010. OIEA. Laboratorio IRD-CNEN-BRASIL.
- Rodríguez, E. 2010. Un protocolo para la evaluación de la exposición interna ocupacional para I-131 en los Servicios de Medicina Nuclear, VIII Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear Medellín Colombia.