

## Metodología para la evaluación de la idoneidad de las barreras en Medicina Nuclear

### Assessing Methodology for Nuclear Medicine Barrier Suitability

Xiomara Cely<sup>1</sup>, Nathaly Barbosa<sup>2</sup>, Beatriz Quiroz<sup>3</sup>

---

**XIOMARA, C.; BARBOSA, N.; QUIROZ, B.** Metodología para la evaluación de la idoneidad de las barreras en Medicina Nuclear. *J. health med. sci.*, 9(3):83-89, 2023.

**RESUMEN:** Este documento presenta una exhaustiva verificación de los sistemas de blindaje en un servicio de terapias radiometabólicas, ubicada en el cuarto piso del edificio de Medicina Nuclear. En esta área, se llevan a cabo terapias con  $I^{131}$ ,  $Lu^{177}$  y  $Ra^{223}$  al menos tres veces por semana, atendiendo a un promedio de 60 pacientes al mes, de los cuales aproximadamente 15 son tratados con terapias de baja actividad. Todo esto se realiza en estricto cumplimiento de los límites de dosis establecidos para la zona, los horarios de ocupación, los puntos de control y el equipo de medición correspondiente. La metodología propuesta está diseñada para abordar las necesidades prácticas de los centros de terapias radiometabólicas en su funcionamiento diario, considerando las condiciones reales de exposición. Los resultados confirman la idoneidad de los sistemas de blindaje, adaptados específicamente a las actividades desarrolladas en estas instalaciones.

**PALABRAS CLAVE:** Evaluación de Blindaje, Monitoreo de Radiación, Manipulación de Fuentes Radiactivas, Cumplimiento de Límites de Dosis.

---

## INTRODUCCIÓN

Dentro de las necesidades básicas de cualquier instalación que maneje radiaciones ionizantes es imperante que el diseño y la verificación de los blindajes estructurales garanticen que la contención de la radiación se mantenga por debajo los límites de dosis establecidos por la regulación nacional y las recomendaciones internacionales. Es por esta razón que organizaciones internacionales como el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) menciona la necesidad de establecer y ejecutar programas de monitoreo que garanticen las exposiciones seguras del público, manteniéndolas por debajo de los límites asignados a este rol, evaluando la exposición externa debida a fuentes radiactivas, descargas de vertimientos líquidos radiactivos y cualquier otro parámetro que pueda producir exposiciones al público [OIEA (2016)].

Las metodologías de diseño y evaluación de blindajes para equipos generadores de radiaciones

ionizantes han sido ampliamente difundidas e incluso unificadas. Por ejemplo, La Comisión Nacional de Protección Radiológica (NCRP por sus siglas en inglés) en su publicación número 147, recomienda las metodologías para blindar haces de radiación primarios y secundarios, así como la verificación de los blindajes instalados. Para el caso de los blindajes en instalaciones de medicina nuclear se requieren metodologías particulares que consideren no solo la transmisión de fuentes gamma polienergéticas, sino fuentes abiertas que decaen rápidamente en el tiempo y que son blindadas parcialmente por el paciente tras la administración del radiofármaco. Una metodología para el blindaje de instalaciones de tomografía por emisión de positrones (PET) que ha sido ampliamente difundida y utilizada, es la publicación Task Group 108 de la Asociación Americana de Física en Medicina (AAPM), la cual incluye los factores antes mencionados, así como otros de interés para radionucleidos de corta semivida como lo son los radiofármacos usados para PET.

<sup>1</sup> Servicio de Medicina Nuclear, Clínica Internacional de Alta Tecnología Clinaltec., Ibagué, Colombia.

<sup>2</sup> Servicio de Medicina Nuclear, Fundación C.T.I.C., Bogotá, Colombia.

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Cancerología, Bogotá, Colombia.

\* Email de correspondencia: [fisicamedicinanuclear@clinaltec.com.co](mailto:fisicamedicinanuclear@clinaltec.com.co)

Sin embargo, para el caso de medicina nuclear terapéutica no existen metodologías estandarizadas y ampliamente utilizadas para el cálculo de blindajes estructurales, como tampoco, estudios de protección radiológica para la verificación y evaluación de la idoneidad de las barreras instaladas, como sí están definidas para los equipos generadores de radiación ionizante en el Capítulo 6 de la publicación 147 de la NCRP. La evaluación de la idoneidad de las barreras es una revisión in situ de la instalación realizada por un experto cualificado, que se realiza después de que se completa la construcción o adecuaciones estructurales de la instalación y que consta de: una inspección para verificar que las barreras estén correctamente colocadas, contiguas y libres de vacíos o defectos; y una evaluación de la adecuación del blindaje para verificar que las barreras atenúan adecuadamente las exposiciones en áreas colindantes, contemplando la relación del factor de ocupación (T) y el límite de dosis (P) empleado para el cálculo de las barreras (P/T) [NCRP (2004)]. La adaptación de esta metodología a la medicina nuclear requiere considerar que la fuente radiactiva a blindar es un paciente que atenúa parcialmente las emisiones y que elimina biológicamente el radiofármaco.

Con el fin de establecer una metodología para la evaluación de la idoneidad de las barreras de un centro de referencia en terapias radiometabólicas, se evaluaron las barreras estructurales en una instalación de terapias radiometabólicas. Esta área compuesta por cuatro habitaciones exclusivas para estas terapias, así como un consultorio para administrar terapias ambulatorias de baja actividad (<1,11GBq), se encuentra en el cuarto piso del edificio de hospitalización, y resulta un escenario ideal para evaluar diferentes escenarios de exposición.

El presente trabajo presenta la aplicación de una metodología sencilla, simulando condiciones reales de exposición, para la verificación de la idoneidad de las barreras en medicina nuclear terapéutica adaptando las recomendaciones de la publicación 147 de la NCRP y evaluando los equipos más adecuados.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El método recomendado por la NCRP para evaluar la idoneidad del blindaje se basa en la determinación del factor de transmisión ( $B(x_{barrera})$ ) utilizando una

fuentes adecuada. Luego, se determina N, el número de pacientes por semana que se pueden examinar sin exceder el valor semanal apropiado de dosis.

El factor de transmisión se define como la relación entre la tasa de dosis detrás de una barrera, de espesor  $x_{barrera}$ , y la tasa de dosis en el mismo lugar sin barrera de radiación intermedia, así:

$$B(x_{barrera}) = (P/T) \cdot d^2 / D_0 \cdot N$$

Donde, donde d es la distancia entre la fuente de radiación y el individuo más allá de la barrera,  $D_0$  es el promedio de tasa de dosis sin barrera por paciente a 1 m de la fuente, N es el número esperado de pacientes en la habitación por semana, P es el objetivo de diseño de blindaje semanal en las áreas colindantes y T es el factor de ocupación.

Todos los puntos evaluados, mostrados en la Figura 2, se encuentran en zonas clasificadas como públicas. Las medidas de tasa de dosis registradas después de las barreras estructurales se tomaron con la capacidad máxima de la instalación, es decir, 5 pacientes hospitalizados simultáneamente cada uno en una habitación: 4 de alta actividad (3 se les administra 7400 MBq, a uno de ellos 3700 MBq) ubicados en las habitaciones de internación y 1 de baja actividad (1110 MBq) ubicados como se muestra en la Figura 1.

Sin embargo, para terapias radiometabólicas se debe considerar que la exposición en áreas colindantes irá disminuyendo desde la administración de la terapia hasta el alta del paciente conforme disminuye la actividad retenida por el paciente. Por lo anterior, es necesario considerar la dosis total absorbida y no la tasa de dosis, así las cosas, la dosis acumulada sin barrera a un metro del paciente será:

$$D_0 = \int_0^{t_i} \dot{D}_0 dt = D_0 \cdot R(t)$$

donde:

$$Rt = \int_0^{t_i} \left[ F_1 e^{-\frac{\ln(2)t_i}{T_{eff1}}} + F_2 e^{-\frac{\ln(2)t_i}{T_{eff2}}} \right] dt$$

$t_i$  corresponde al tiempo de exposición para el cálculo de dosis (tiempo de hospitalización del paciente 30 h), las

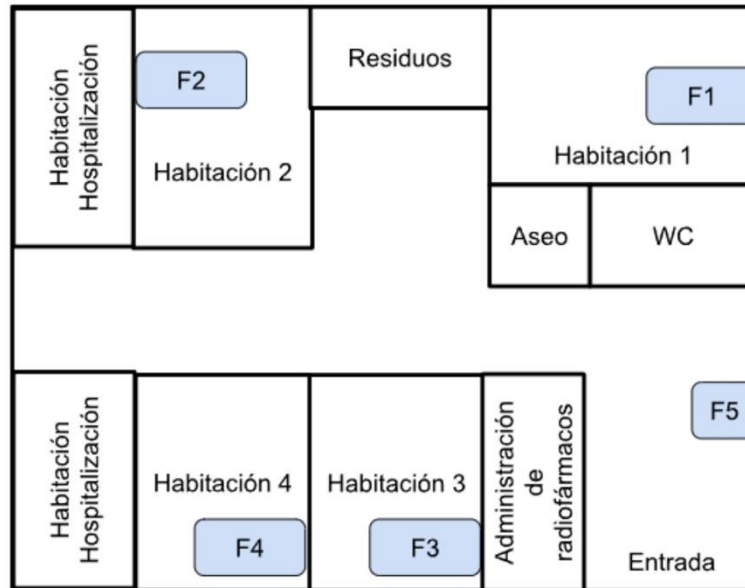


Figura 1. Distribución área de Terapias Metabólicas que colinda con las habitaciones 1 y 2 de hospitalización. Los rectángulos F1 a F5 señalan la ubicación de las camas en las cuales se ubicaron a los pacientes al momento de tomar las medidas.

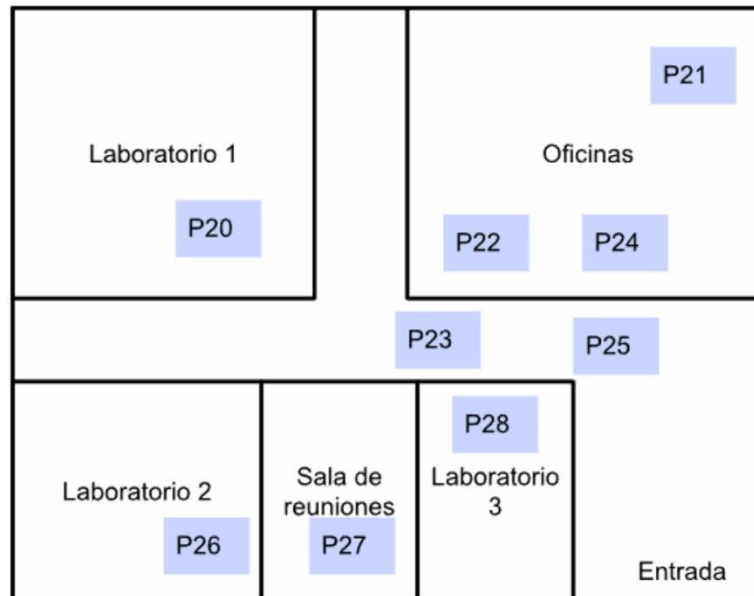


Figura 2. Distribución del servicio que colindan con el área de terapias metabólicas y las zonas de control seleccionadas para realizar las medidas.

proporciones de adopción extratiroidea ( $F_1$ ) y tiroidea ( $F_2$ ) y los llamados tiempos efectivos de eliminación rápida ( $T_{eff_1}$ ) y lenta ( $T_{eff_2}$ ) del radiofármaco, asociados a cada una de las

absorciones. Para el presente trabajo se tomaron estos valores los valores de vidas medias efectivas siendo  $T_{eff_1} = 0,4 d$  y  $T_{eff_2} = 8 d$  y proporciones de absorción de  $F_1 = 0,95$  y  $F_2 = 0,05$  [NCRP (2007)].

Considerando que el tiempo de integración de  $R(t)$  va desde  $t = 0$  hasta el tiempo promedio de hospitalización del paciente de 30 horas, el factor de ocupación también fue re-escalado, tal que,  $T = 1$  corresponde a la ocupación total del lugar durante las 30 h, con factores de ocupación entre 1 y 0,3 dependiendo de los tiempos que permanecieran del público. Así las cosas, la dosis límite de diseño, también corresponderá a la dosis límite por procedimiento en cada uno de los puntos evaluados.

#### 1. ***Evaluación de la tecnología más adecuada.***

Para evaluar la transmisión de las barreras se usaron tres detectores de radiación (Figura 3):

- Cámara de ionización de gran volumen Ludlum modelo 9DP, la cual detecta Rayos gamma y X por encima de 25 keV, con un rango de 0 - 50 mSv/h, con una visualización mínima de 0,01  $\mu$ Sv/h, con tiempo de estabilización de varios segundos [Model 9DP Pressurized Ion Chamber - Ludlum Measurements Inc.]
- Detector de centelleo RaySafe X2 con resolución de 0 a 150 mSv/h para energías por encima de los 50 keV, con tiempo de estabilización de milisegundos [*RaySafe - Leader in X-Ray Radiation Dosimetry Management*]
- Geiger-Müller Fluke ASM 990 con rango 0,9 mSv/h a 9 mSv/h para energías gamma superiores a 60 keV, con tiempo de estabilización de varios segundos [ASM-990 Advanced Survey Meter | Fluke Biomedical].

Todos los detectores empleados en este estudio contaban con calibraciones vigentes realizadas por laboratorios certificados y verificaciones funcionales regulares (mensuales) realizadas por la misma instalación.

Inmediatamente después de la administración, se llevaron los pacientes a los puntos señalados en la Figura 1 y se midieron las tasas de dosis después de las barretas estructurales en los puntos señalados en la Figura 2, tomándose tres medidas en cada punto. Dado que la fluencia de partículas fue baja, se tomaron tasas de dosis integradas de 30 segundos a 30 cm de la barrera, en 3 puntos diferentes distribuidos en la barrera como se muestra

Estas medidas se realizaron con los 5 pacientes en sus respectivas ubicaciones en un mismo tiempo, es decir, estas medidas incluyen la contribución de todos los pacientes.

## RESULTADOS

Se registraron las tasas de dosis después de las barreras en 12 puntos, 9 en el servicio de patología ubicado en el tercer piso y 3 en el área de terapias metabólicas ubicados en el 4 piso, si bien en el servicio se pueden administrar tres radioisótopos, se realizó los cálculos con I-131 ya que este, además de ser el más frecuente, es el radiofármaco que toma más tiempo a los pacientes en ser metabolizado. La población con la que se le realizó el trabajo aquí mostrado no tuvo restricciones en sexo, patología o talla, salvo que todos fueren mayores de edad.

Todas las barreras están compuestas de ladrillo macizo de densidad no conocida y algunas paredes con refuerzos en plomo de hasta 3 milímetros de lámina de plomo. En las Figura 1 y Figura 2 se describe la distribución de las áreas y la selección de punto de control.

La ubicación de los puntos de control se seleccionó según los puestos de trabajo. Ya que en todos los puntos no se tenía la misma exposición debido al tiempo de permanencia del personal, se definieron dos tiempos  $t_i$  para calcular  $R(t)$ , 24 horas para el caso de los pacientes de hospitalización (Habitación 1 y 2) y en el caso de los puestos rotativos (Laboratorios) se asumió que el tiempo de permanencia era 8 h diarias en los puntos con mayor tasa de dosis medida (Tabla I).

Al comparar los valores medidos con el detector de centelleo antes y después de las barreras se encuentran que la disminución de la exposición superior al 95% en todos los puntos evaluados (Tabla II).

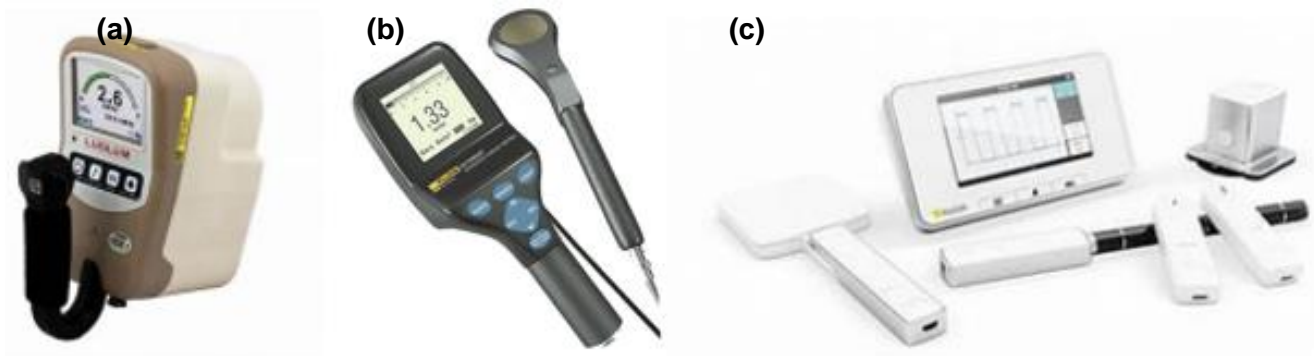


Figura 3. Detectores empleados en el estudio. (a) cámara de ionización (b) Geiger-Müller (c) Detector de centelleo.



Figura 4. (a) Distancia entre la barrera y el detector. (b) Distribución de los puntos de medida en la barrera.

Tabla I. Constante R(t) para los puntos control de intereses del área de terapias metabólicas (cuarto piso) y laboratorioscolindantes (tercer piso.)

Punto	R[t]
<b>Área de terapias metabólicas</b>	
Administración de radiofármacos	6,17
Habitación de hospitalización 1	11,98
Habitación de hospitalización 2	11,98
<b>Laboratorios</b>	
P20	6,17
P21	6,92
P22	6,92
P23	0,39
P24	6,17
P25	6,17
P26	6,17
P27	6,17
P28	6,17

Posteriormente en el cálculo de la dosis por episodio de exposición teniendo en cuenta la distancia entre la fuente y la persona representativa del cálculo, puede verse que las dosis por cada episodio de hospitalización son del orden de los nano sievert, cinco órdenes de magnitud por debajo del límite de dosis semanal para los trabajadores ocupacionalmente expuestos y de cuatro órdenes de magnitud para miembros del público. Lo anterior se ve reflejado en el número de episodios de hospitalización que podrían suceder en la misma semana que no conllevarían a una superación de los límites de dosis para los trabajadores, pacientes y miembros del público (Tabla III).

Tabla II. Tasas de dosis antes y después de las barreras en los puntos de control.

Punto	R[t]
<b>Área de terapias metabólicas</b>	
Administración de radiofármacos	6,17
Habitación de hospitalización 1	11,98
Habitación de hospitalización 2	11,98
<b>Laboratorios</b>	
P20	6,17
P21	6,92
P22	6,92
P23	0,39
P24	6,17
P25	6,17
P26	6,17
P27	6,17
P28	6,17

Se debe notar que esta comparación se realizó con el promedio de las medidas de tasa de dosis realizadas en los tres puntos señalados en la Figura 4.b. después de la barrera.

#### *Evaluación de la tecnología más adecuada*

Al comparar las medidas obtenidas con todos los detectores, el detector Geiger Müller mostró un comportamiento inestable y poco producible para las medidas de tasa de dosis después de las barreras con medias de 5,62  $\mu\text{Sv/h}$  y desviación estándar de 4,96  $\mu\text{Sv/h}$ . Para la cámara de ionización, el equipo no registró de tasa de dosis después de las barreras (exceptuando 2 de las 32 barreras evaluadas), lo cual impidió realizar el cálculo de la transmisión. Con el equipo centellador se lograron registrar medidas en todos los puntos seleccionados, además de una desviación estándar de 0,08  $\mu\text{Sv/h}$  para las medidas registradas para las tasas de dosis después de las barreras (Tabla III).

## DISCUSIÓN

Para la puesta en marcha de un blindaje se han reportado cuatro factores principales: la optimización del flujo de pacientes y carga de trabajo, la asignación de equipo y espacio, los métodos de cálculo de blindaje y finalmente la integridad del blindaje. Siendo el último responsable de identificar barreras blindadas inadecuadamente o incluso sin blindaje que contradicen el plan de blindaje original. Este escenario puede presentarse de forma más frecuente con barreras construidas con ladrillo o concreto u hormigón ya que las densidades de las paredes pueden no corresponder con el cálculo realizado [Salehzahi & Tse, 2020].

Considerando que para terapias radiometabólicas los blindajes son hechos en materiales diferentes al plomo, como lo es el caso de las barreras de la instalación evaluadas que son en su mayoría de ladrillo macizo de una densidad no conocida, el paso de evaluación de la integridad del blindaje resulta ser muy relevante para evaluar la seguridad de la práctica.

Tabla III. Cantidad de procedimientos permitidos por semana en puntos de control.

<b>Área terapias radiometabólicas</b>			
	<b>Consultorio</b>	<b>Habitación hospitalización 1</b>	<b>Habitación Hospitalización 2</b>
Dosis por episodio ( $\mu\text{Sv}$ )	8,40E-04	2,17E-02	1,74E-02
Límite semanal de dosis ( $\mu\text{Sv/sem}$ )	100	20	20
Número de procedimientos por semana	1,19E+05	9,45E+0 2	1,15E+03
<b>Laboratorios</b>			
	<b>P20</b>	<b>P21</b>	<b>P22</b>
Dosis por episodio ( $\mu\text{Sv}$ )	1,80E-04	2,70E-04	2,00E-04
Límite semanal de dosis ( $\mu\text{Sv/sem}$ )	20	20	20
Número de procedimientos por semana	1,10E+05	7,32E+04	9,76E+04
	<b>P23</b>	<b>P24</b>	<b>P25</b>
Dosis por episodio ( $\mu\text{Sv}$ )	1,00E-05	2,40E-05	4,90E-04
Límite semanal de dosis ( $\mu\text{Sv/sem}$ )	20	20	20
Número de procedimientos por semana	1,33E+06	8,22E+0 4	4,11E+04
	<b>P26</b>	<b>P27</b>	<b>P28</b>
Dosis por episodio ( $\mu\text{Sv}$ )	1,80E-04	1,80E-04	1,80E-04
Límite semanal de dosis ( $\mu\text{Sv/sem}$ )	20	20	20
Número de procedimientos por semana	1,10E+05	1,10E+0 5	1,10E+05

La selección del detector de radiación es clave para la correcta evaluación de los blindajes estructurales, si bien, las cámaras de ionización son los equipos sugeridos para este tipo de ejercicios por su buena reproducibilidad en las medidas para partículas gamma [IAEA (2001)], presentan problemas cuando la fluencia de las partículas es baja, como lo es en estos casos, razón por la cual es adecuado emplear un equipo que permita realizar estas medidas sin comprometer la reproducibilidad. Si bien, los equipos centelladores como el RaySafe tienen baja eficiencia para detectar partículas gamma [Instituto Balseiro (2003)], se subsana este punto al aumentar la estadística de medida (tres medidas por cada punto), para garantizar la reproducibilidad de las medidas y así obtener datos confiables y comparables entre las diferentes tecnologías.

Es importante recalcar que la metodología planteada contempla la estimación de dosis con la función de transmisión de haz ancho en el que el paciente es la fuente de radiación. Este

planteamiento se aproxima de forma más real a las condiciones de exposición de trabajadores y pacientes que permanecen en las zonas aledañas a las habitaciones de terapias radiometabólicas, ya que contempla la atenuación y dispersión de la fuente de radiación por el mismo paciente. Sin embargo, para la verificación de blindajes se desea estimar el blindaje instalado (milímetros de plomo o equivalente de la barrera) no es recomendable usar esta geometría, sino una que se aproxime más a una fuente puntual y a una de haz estrecho.

Si bien se han realizado varios esfuerzos para la estandarización de la metodología de evaluación, como lo es la publicación en curso de la AAPM TG313, estos se ven condicionados por la falta de recursos de las instalaciones. Por esta razón, se evaluaron diferentes equipos detectores de radiación ionizante con el fin de brindar a los usuarios opciones dentro de los equipos usados en la práctica clínica. Se encontró que, aunque el Geiger-Müller es el equipo más ampliamente usado para la ejecución de los programas de seguridad y

vigilancia radiológica en la práctica de medicina nuclear, su uso para la evaluación de blindajes no es apropiado por su falta de reproducibilidad y de precisión en la lectura.

## CONCLUSIONES

La metodología planteada es una solución práctica y cercana a las condiciones reales de exposición para los estudios de evaluación de la idoneidad de las barreras en instalaciones de terapias radiometabólicas.

**ABSTRACT:** This document presents an exhaustive verification of shielding systems in a radiometabolic therapy service, located on the fourth floor of the Nuclear Medicine building. In this area, therapies with  $I^{131}$ ,  $Lu^{177}$  and  $Ra^{223}$  are carried out at least three times a week, serving an average of 60 patients per month, of which approximately 15 are treated with low-activity therapies. All this is carried out in strict compliance with the dose limits established for the zone, the occupation times, the control points and the corresponding measurement equipment. The proposed methodology is designed to address the practical needs of radiometabolic therapy centers in their daily operation, considering real exposure conditions. The results confirm the suitability of the shielding systems, specifically adapted to the activities carried out in these installations.

**KEYWORDS:** Shielding Evaluation, Radiation Monitoring, Radioactive Source Handling, Dose Limit Compliance.

## BIBLIOGRAFÍA

Salud, Organización Mundial de La. *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad*. Text, International Atomic Energy Agency, 2016, pp. 1-451. [www.iaea.org](http://www.iaea.org), <https://www.iaea.org/es/publications/10812/proteccion-radiologica-y-seguridad-de-las-fuentes-de-radiacion-normas-basicas-internacionales-de-seguridad>.

National Council on Radiation Protection and Measurements, editor. *Structural shielding design for medical X-ray imaging facilities*. National Council on Radiation Protection and Measurement, 2004.

Model 9DP Pressurized Ion Chamber - Ludlum Measurements Inc. [en línea], (sin fecha). *Ludlum Measurements, Inc. - Ludlum Measurements Inc.* [Consultado el 25 de octubre de 2023]. Disponible en: <https://ludlums.com/products/all-products/product/model-9dp>

RaySafe - Leader in X-Ray Radiation Dosimetry Management. [Consultado el 25 de octubre de 2023]. Disponible en: [https://www.raysafe.com/sites/default/files/2021-07/raysafe\\_x2\\_specification\\_brochure.pdf](https://www.raysafe.com/sites/default/files/2021-07/raysafe_x2_specification_brochure.pdf)

ASM-990 Advanced Survey Meter | Fluke Biomedical [en línea]. *Biomedical Testing Equipment Solutions | Fluke Biomedical*. [Consultado el 25 de octubre de 2023]. Disponible en: <https://www.flukebiomedical.com/products/radiation-measurement/radiation-safety/asm-990-advanced-survey-meter>

National Council on Radiation Protection and Measurements y National Council on Radiation Protection and Measurements, editores. *Management of radionuclide therapy patients*. National Council on Radiation Protection and Measurements, 2007.

Salehzahi, F.; Tse, J. "Shielding commissioning factors in nuclear medicine facilities". *Journal of Radiological Protection*, 40(1):165-80, 2020. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab504e>.

IAEA, (2001). *Protocolos de control de calidad en radio-diagnóstico* arcal XLIX.

Instituto Balseiro, (2003). PRINCIPIOS DE DETECCIÓN DE LA RADIACION [en línea]. *Laboratorio: Física de las radiaciones*. [Consultado el 25 de octubre de 2023]. Disponible en: [http://labrad.fisica.edu.uy/docs/Detectores\\_de\\_Radiacion\\_Balseiro.pdf](http://labrad.fisica.edu.uy/docs/Detectores_de_Radiacion_Balseiro.pdf)

### Autor de correspondencia

Dra. Xiomara Cely Segura  
Servicio de Medicina Nuclear, Clínica Internacional de Alta Tecnología Clinaltec., Ibagué, Colombia.  
Email: [fisicamedicinanuclear@clinaltec.com.co](mailto:fisicamedicinanuclear@clinaltec.com.co)

Recibido: 27 de Julio, 2023  
Aceptado: 30 de Agosto, 2023