

Verificación funcional de detectores de radiación tipo Geiger-Müller en medicina nuclear y radiofarmacia del Instituto Nacional de Cancerología: una propuesta para el aseguramiento de la calidad de equipos de protección radiológica

Routine constancy tests of Geiger-Müller detectors in nuclear medicine and radiopharmacy–Instituto Nacional de Cancerología: A quality assurance proposal for radiation protection equipment

Nathaly Barbosa¹, Lorena Sandoval¹, Juan Sebastián Quimbayo², Xiomara Cely³,
Ángela Londoño³

Citación: N. Barbosa, L. Sandoval, J. S. Quimbayo, X. Cely y A. Londoño, “Verificación funcional de detectores de radiación tipo Geiger-Müller en medicina nuclear y radiofarmacia del Instituto Nacional de Cancerología: una propuesta para el aseguramiento de la calidad de equipos de protección radiológica”, *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 4, pp. 45-54, 2020.

<https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.4.2020.520>

Resumen

Basado en la implementación del plan de aseguramiento de la calidad, el objetivo principal de este estudio es realizar el seguimiento y análisis de las verificaciones funcionales realizadas a los equipos detectores de radiación ionizante del Servicio de Medicina Nuclear y del Servicio de Radiofarmacia del Instituto Nacional de Cancerología E. S. E. (INC). Los equipos de estudio fueron dieciséis detectores tipo Geiger-Müller, fijos y portátiles, con fuentes certificadas selladas tipo gotero y planas para la recolección de mediciones realizadas por un periodo de tres años. Como resultado, se encontraron comportamientos variables siempre en el rango del 20 % del error porcentual existentes entre el valor medido y el valor de referencia de cada equipo. El estudio permite concluir que los detectores muestran un comportamiento esperado dentro de la reproducibilidad propia del detector y las desviaciones propias de los diferentes operadores; sin embargo, y con el fin de minimizar las variaciones, es imprescin-

Revista Investigaciones y Aplicaciones
Nucleares, 4, 45-54, 2020
Recibido: 1 de junio de 2020
Aceptado: 21 de agosto de 2020
Publicado en línea: 5 de noviembre de 2020
Doi: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.4.2020.520>



Esta obra está bajo licencia internacional
Creative Commons Reconocimiento 4.0.

¹ Servicio de Medicina Nuclear, Instituto Nacional de Cancerología E. S. E., Bogotá, Colombia

² Grupo Radiofarmacia y Ciclotrón, Instituto Nacional de Cancerología E. S. E., Bogotá, Colombia

³ Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Email de correspondencia: nbarbosap@cancer.gov.co

dible contar con un programa de aseguramiento de la calidad de los equipos detectores de radiación que vele por la idoneidad de las medidas realizadas.

Palabras clave: Verificaciones funcionales, detector Geiger-Müller, protección radiológica, plan de aseguramiento de la calidad.

Abstract

Based on implementation of the relevant quality assurance plan, the main objective of this study was to monitor and analyze the routine constancy tests conducted on the ionizing radiation detection equipment of the nuclear medicine and radiopharmacy services of the Instituto Nacional de Cancerología E.S.E. (INC). The study equipment was 16 Geiger-Müller detectors, fixed and portable, with certified sealed dropper and flat sources for collecting measurements made over a period of three years. The results showed that variable behaviors were always found within the range of 20% of the percentage error between the measured value and the reference value for each piece of equipment. This study allows us to conclude that the detectors exhibited expected behavior given their reproducibility and operator deviations; however, to minimize variation, it is essential to have a quality assurance program for radiation detection equipment that ensures the suitability of the measures that are implemented.

Keywords: Routine constancy test, Geiger-Müller, radiation protection, quality assurance.

1. Introducción

La medicina nuclear es una especialidad de la medicina que usa radionúclidos ligados generalmente a moléculas específicas, llamados *radiofármacos*, con fines diagnósticos, terapéuticos y de seguimiento de tratamientos [1]. Al requerir el uso directo de fuentes radiactivas no selladas, se debe contar con un programa de aseguramiento de la calidad que vele por la seguridad radiológica de los pacientes, los trabajadores y el público en general. Dicho programa requiere múltiples barreras de seguridad, entre las que se encuentra el uso de equipos detectores de radiación ionizante, que permiten identificar y medir un posible riesgo durante la ejecución de los procesos propios de la práctica. La mayoría de los detectores de radiación utilizados en los servicios de medicina nuclear y radiofarmacia son de tipo Geiger-Müller (GM), que son calibrados y diseñados principalmente para medir dosis equivalente ambiental $Hp^*(10)$ [2]. Entre las ventajas de este tipo de detectores se encuentran su bajo costo, peso ligero, robustez y su alta sensibilidad para detectar partículas beta y radiación gamma; algunos incluso están equipados con ventanas muy delgadas que permiten la detección de radiación alfa. La presentación más usada del GM en medicina nuclear

tiene una ventana plana, siendo útiles para encontrar e identificar contaminación radiactiva [3], [4].

Para garantizar que los equipos del Servicio de Medicina Nuclear y del Servicio de Radiofarmacia funcionen correctamente, y aplicando lo establecido en la Circular 29 de 1997 y el Decreto 1769 de 1994, del Ministerio de Salud (artículo 12), se debe crear un plan de aseguramiento de la calidad de los equipos del servicio. En el capítulo “Mantenimiento de dotación” de dicho plan se deben incluir todos los equipos relacionados con el apoyo hospitalario, entre los cuales están los detectores GM que se analizaron en el presente estudio. Lo anterior, sin perder de vista la Resolución 181434 de 2002 del Ministerio de Minas y Energía, que especifica en el artículo 50: “Equipos y procedimientos de verificación [...] los titulares de autorizaciones garantizarán la existencia de equipos adecuados y establecerán los procedimientos para su verificación, el titular deberá cumplir con la frecuencia de calibración o verificación establecida” [5]. Esta es una tarea en la que participan todos los estamentos del INC: las personas que ostentan la autoridad en los órganos de dirección y gestión, los profesionales dedicados al ejercicio de la protección radiológica y los trabajadores expuestos a las radiaciones ionizantes. El Programa de Vigilancia y Seguridad Radiológica del INC del Servicio de

Medicina Nuclear y del Servicio de Radiofarmacia se encuentra encabezado por el director general, seguido por el subdirector de Atención Médica y Docencia, el Oficial de Protección Radiológica (OPR), los coordinadores de los servicios, y los funcionarios administrativos y funcionarios asistenciales. El OPR se encarga de hacer cumplir las disposiciones legales vigentes sobre protección radiológica y de establecer las condiciones seguras de trabajo con radiaciones ionizantes para los trabajadores, pacientes y público en general, supervisando y manejando de forma rigurosa todo el inventario de las fuentes y equipos detectores de radiación, siendo el coordinador de cada servicio quien aprueba las actividades de control en el Servicio de Medicina Nuclear y Radiofarmacia.

Las verificaciones funcionales de los detectores de radiación deben hacerse de forma rutinaria. Además, estos equipos deben estar incluidos en el plan y el cronograma de mantenimiento de equipos hospitalarios, y su uso debe respetar los criterios establecidos para las frecuencias establecidas. La frecuencia del mantenimiento preventivo descrito en el *Plan de mantenimiento* depende de la peligrosidad del equipo, el funcionamiento, uso y frecuencia propuesta por el fabricante, entre otros criterios [6], [7]. Estos procedimientos pueden ser diarios, semanales, trimestrales, semestrales o anuales [8], según la necesidad y el uso del equipo.

Por lo anterior, el Servicio de Medicina Nuclear y el Servicio de Radiofarmacia del INC creó en 2017, y desde entonces ha venido implementando, un plan de aseguramiento de la calidad (PAC) para los equipos de diagnóstico y apoyo del servicio mediante calibraciones periódicas realizadas principalmente por el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica del Servicio Geológico Colombiano y verificaciones funcionales trimestrales y mensuales realizadas por personal capacitado del INC, para comprobar que los detectores de radiación detectan emisiones radiactivas de un conjunto de fuentes certificadas; además, se hacen inspecciones físicas de rutina a los equipos que requieran seguimiento. Así, recolectando los datos de las verificaciones, se logra analizar la trazabilidad de estos en el tiempo.

2. Metodología

En el inventario de los equipos de protección radiológica del Servicio de Medicina Nuclear y del Servicio de Radiofarmacia hay inscritos más de 46 equipos detectores de radiación

de diferente tipo (Geiger-Müller, cámara de ionización, contador proporcional y centelladores). En la tabla 2 se muestran las principales características y especificaciones técnicas de los dieciséis detectores tipo Geiger-Müller analizados en el presente estudio, a los que se les realizaron las verificaciones funcionales durante un periodo de tres años. No fueron incluidos los equipos a los que se les hicieron ajustes tras la calibración y cuyos valores de referencia se modificaron durante el periodo evaluado. En la figura 1 se muestran detectores de radiación portátil y fijos de tipo GM utilizados durante los procesos de producción en la radiofarmacia hospitalaria y medicina nuclear (diagnóstico y terapia).



Figura 1. (a) Detector GM Ludlum C-14 [9]. (b) Detector GM Fluke Bio-medical ASM 990 [10]. (c) Monitor de área GM Medismarts GM-42 [11]. (d) Monitor de área GM Ludlum 375 [12]

El proceso de verificación está descrito en un instructivo para el control de calidad de equipos de protección radiológica. En él se especifica cómo realizar el procedimiento para comprobar la funcionalidad y el comportamiento de los equipos usados en la práctica de medicina nuclear y radiofarmacia. El operador comienza por comprobar la integridad física del equipo, incluyendo el estado de la pantalla de visualización, el nivel de baterías en los equipos portátiles o la estabilidad del suministro de energía, según sea el caso. Para realizar la verificación de constancia y funcionalidad del equipo se consideran previamente los parámetros de contaminación superficial del equipo y mediciones ambientales, seguidos de una medición con una fuente radiactiva certificada. La geometría de medición se definió en la realización de las pruebas de referencia; para ello se estudió la respues-

ta angular de cada detector, se definió el punto de respuesta máxima y se estableció en cada equipo un valor de referencia con una fuente de Cs-137 (fuente tipo gotero, figura 2a) durante las pruebas de aceptación o de referencia; de forma análoga se procedió con los equipos de contaminación superficial con las fuentes planas de C-14, Cl-36, Sr90/Y-90 y Am 241 (fuentes planas, figura 2b). La tabla 1 muestra las principales características de las fuentes (que deben ser certificadas y autorizadas) usadas en las pruebas de constancia. En mediciones de radiación gamma es preferible usar un radioisótopo emisor de radiación gamma monoenergética de larga semivida, pues permite llevar una trazabilidad de las medidas más confiable y estable en el tiempo.

Tabla 1. Principales características de las fuentes de calibración usadas en la verificación de los detectores de radiación GM [13]

Radioisótopo	Semivida (años)	Radiación emitida	Energía (KeV)	Geometría
Cs-137	30,08	γ	661,65	Gotero. Nucleido sembrado en resina sólida
		β^-	514,03	
C-14	5700	β^-	156,47	Plana
Cl-36	3×10^5	β^-	709,55	($10 \times 10 \text{ cm}^2$)
Sr-90/Y-90	28,79	β^-	546	sembrada en
Am-241	432,6	α	5.485,56	placa metálica

Las fuentes son conservadas de acuerdo con las recomendaciones del fabricante y dentro de los contenedores originales, para velar por su integridad; también se les hace un frotis anual para determinar si hubo pérdida de hermetici-

dad. Dado que las fuentes de referencia tienen una larga vida media, si llegan a existir variaciones sustanciales entre las medidas y los valores de referencia, las diferencias se pueden asociar a posibles daños en el equipo, desajustes, problemas en la sonda y contaminación superficial, entre otros factores. Se recomienda que el porcentaje de decaimiento de las fuentes empleadas en la verificación no supere el 5% de diferencia porcentual del valor de referencia de la fuente dado por el fabricante, con el objetivo de minimizar la incertidumbre asociada al promedio de emisión de radiación a lo largo de los años; en el caso de las fuentes planas se considera un periodo de cinco años, ya que no se puede garantizar en el tiempo la uniformidad de la emisión en la superficie de la fuente. En la tabla 3 se muestra el porcentaje de decaimiento, a lo largo de los años, de las fuentes empleadas en este estudio.

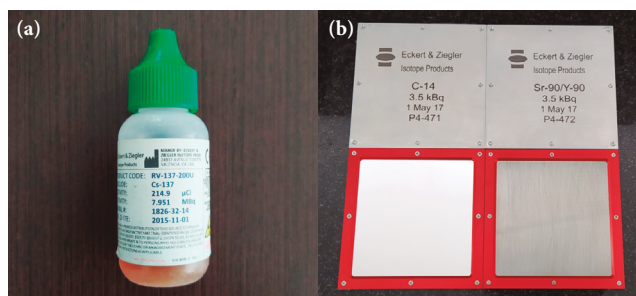


Figura 2. (a) Fuente de Cs-137 tipo gotero. (b) Caras anteriores (C-14, Sr-90/Y-90) y posteriores (Cl-36, Am-241) de las fuentes planas de verificación

Tabla 2. Características y especificaciones técnicas de los detectores de radiación GM de los servicios de radiofarmacia y medicina nuclear del INC [14], [12], [11], [15], [16], [9], [10]

Marca y modelo	Técnicas RF, GM Rady	Ludlum 375	Rotem Medismart	Ludlum 44-25	Cardinal Health, Victoreen 190F	Ludlum C14	Fluke ASM 990
Cantidad	2	2	6	1	1	1	3
Ubicación	Monitores ambientales de terapias metabólicas	Monitores ambientales de medicina nuclear	Monitores ambientales radiofarmacia	Terapias metabólicas	Radiofarmacia	Medicina nuclear	Uno en medicina nuclear y dos en radiofarmacia
Modo de operación	Tasa de dosis	Tasa de dosis	Tasa de dosis	Contaminación superficial	Tasa de dosis; contaminación superficial	Tasa de dosis/ cuentas	Tasa de dosis; contaminación superficial
Tipo de radiación	Gamma	X, gamma	Gamma, beta	Beta y gamma	Alfa, beta y gamma	Alfa, beta y gamma	Alfa, beta, gamma, X
Rango de operación	0,1 $\mu\text{Sv/h}$ - 2 mSv/h	1 $\mu\text{Sv/h}$ - 10 mSv/h	0,1 $\mu\text{Sv/h}$ - 10mSv/h	25-50 CPM 0.8- 0.15 $\mu\text{Sv/h}$	0,1 $\mu\text{Sv/h}$ - 1 mSv/h	0-20 mSv/h 0-2000 KCPM	3.500 CPM/mR/h
Rango de energía	50 keV - 10 MeV	50 keV - 1,3 MeV	50 keV - 1,3 MeV	50 keV - 1,3 MeV	60 keV - 3 MeV	60 keV - 3 MeV	Alfa > 3,5 MeV, beta > 35 keV y gamma > 6 keV
Rango de temperatura	22 \pm 5 °C	-15-50 °C	-10-50 °C	-10-50 °C	-10-60 °C	-20-50 °C	-56-85 °C
Humedad relativa	45 \pm 15%	< 95%	40% a 95%	< 95%	0 a 95%	< 95%	< 95%
Tipo de calibración	Intensímetro	Intensímetro	Intensímetro	Contaminación superficial	Intensímetro y contaminación superficial	Intensímetro y contaminación superficial	Intensímetro y contaminación superficial
Condición	Fijo	Fijo	Fijo	Fijo	Portátil	Portátil	Portátil

Tabla 3. Decaimiento porcentual de las fuentes Cs-137, C-14, Cl-36 y Sr-90/Y-90

Radioisótopo	Cs-137	C-14	Cl-36	Sr-90/Y-90
Geometría	Gotero	Plana (10 × 10 cm ²)		
Tiempo (años)	Porcentaje de decaimiento (%)			
1	3	0,1	0,3	2,4
2	5	0,1	0,5	4,8
5	11	0,1	1,2	11,4
8	17	0,1	1,9	17,6
10	21	0,2	2,3	21,4



Figura 3. (a) Fuente de Cs-137 ubicada a 10 cm de la ventana del detector Ludlum C14 y Fluke ASM 990. (b) Fuente de Cs-137 ubicada en el punto de máxima respuesta de los monitores de área Medismarts y Ludlum 375. Con los equipos fijos a gran altura del piso se usan soportes diseñados para garantizar la distancia de medición

Las mediciones de constancia de los equipos se deben realizar en condiciones que permitan garantizar la reproducibilidad de la geometría de la medición, y practicarse cuando no hay producción de radiofármacos y el flujo de pacientes en el Servicio de Medicina Nuclear sea mínimo. Se debe contar con condiciones adecuadas de presión atmosférica, temperatura y humedad relativa, acordes con las recomendaciones del fabricante de cada uno de los equipos. Luego de asegurar que se cuenta con dichas condiciones iniciales, se realiza la medición del fondo radiactivo en tasa de dosis ($\mu\text{Sv/h}$). Para la verificación de la magnitud $H^*(10)$ se ubica la fuente de Cs-137 a una distancia de 10 cm de la ventana de los detectores portátiles (figura 3a). En el caso de los detectores fijos, la fuente debe ser puesta en la geometría establecida para el equipo (ejemplo, figura 3b) y se determina la diferencia porcentual (DP) entre el valor de referencia (V_r) y el promedio de las medidas realizadas (V_m), mediante esta expresión:

$$DP (\%) = 100 * \frac{V_r - V_m}{V_r} \quad (1)$$

donde el valor V_r es el promedio de las mediciones realizadas a 10 cm de la ventana del detector con la fuente de calibración durante la prueba de aceptación o de referencia, corregido por fondo radiactivo. El criterio de aceptación de la diferencia porcentual debe estar en el rango del 20% del valor de referencia [4].

En las verificaciones funcionales asociadas a contaminación superficial se debe caracterizar el fondo en cuentas por segundo $F(cps)$, y con las fuentes planas (figura 2b) se realizan las medidas de tasa de recuento neto en $M(cps)$, como se muestra en la figura 4. Luego, para calcular la actividad experimental (A_{Exp}) de cada una de las fuentes planas, se hace uso de la siguiente ecuación:

$$A_{Exp} = \frac{FC (M (cps) - F(cps))}{\epsilon_d * \epsilon_s} * 100 \quad (2)$$

donde el valor del factor de calibración (FC) se obtiene del certificado de calibración del equipo, dado por un laboratorio secundario de calibración, con la metodología Reporte de Seguridad OIEA, serie n.º 16, sección 7 [17]. En cada una de las fuentes planas, el valor de referencia ϵ_p es la probabilidad de emisión de partículas beta (depende, por lo tanto, del isótopo) y ϵ_s es la eficiencia del detector de radiación beta en términos de su energía; en partículas beta con energía máxima superiores o iguales a 400 keV se establece la eficiencia del detector en 0,5, y en emisiones beta con energía máxima inferior a 400 keV, en 0,25. Finalmente se calcula la diferencia porcentual (DP) entre la actividad de referencia de cada fuente (A_r) y el valor de la actividad experimental (A_{Exp}), usando la siguiente ecuación:

$$DP (\%) = 100 * \frac{A_r - A_{Exp}}{A_r} \quad (3)$$

Por lo tanto, el porcentaje de desviación entre la actividad de referencia y el valor de la actividad experimental no debe exceder un rango del 20%.

Los resultados son registrados por la persona encargada de realizar la prueba, que es supervisada por el oficial de protección radiológica y aprobada por los coordinadores de los servicios. Dichos registros deben archivarlos en orden cronológico en un lugar seguro y accesible, de acuerdo con el control documental de la instalación. En la tabla 3 se muestra un formato de registro (véase el anexo 1).



Figura 4. Verificación funcional de contaminación superficial en el equipo Fluke ASM 990, con fuente plana de Sr-90/Y-90

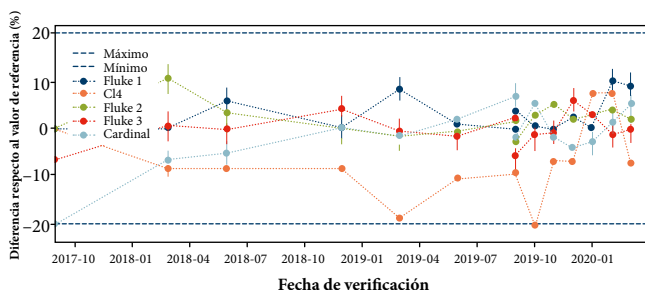


Figura 5. Variación temporal de las diferencias porcentuales entre el valor medido y el valor de referencia en las medidas de tasa de dosis de los detectores portátiles

3. Resultados

En las pruebas realizadas entre julio de 2017 y marzo de 2020 se evaluó la variación de las diferencias porcentuales (DP) entre el valor medido y el valor de referencia, en la geometría descrita, de las mediciones de tasa de dosis y de contaminación superficial. La figura 5 muestra la variación temporal de las DP en las mediciones de tasa de dosis de los equipos portátiles evaluados, donde puede observarse que no hay tendencia. Se evaluó la tendencia temporal de los resultados en cada detector, ajustando cada conjunto de datos a una línea recta. Al calcular el promedio ponderado de las pendientes se encontró en los monitores de tasa de dosis un valor de $0,003 \pm 0,014$, y en contaminación superficial, $0,003 \pm 0,003$, ambos valores incluyendo el cero, por lo que se concluyó que no había tendencia temporal en los datos.

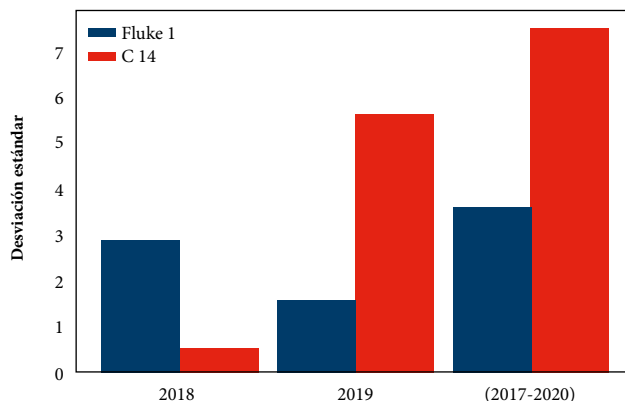


Figura 6. Desviación estándar (DE) de las DP entre el valor medido y el valor de referencia de las medidas de tasa de dosis de los detectores portátiles de medicina nuclear, correspondiente a los años 2018 y 2019, considerando la totalidad de los datos

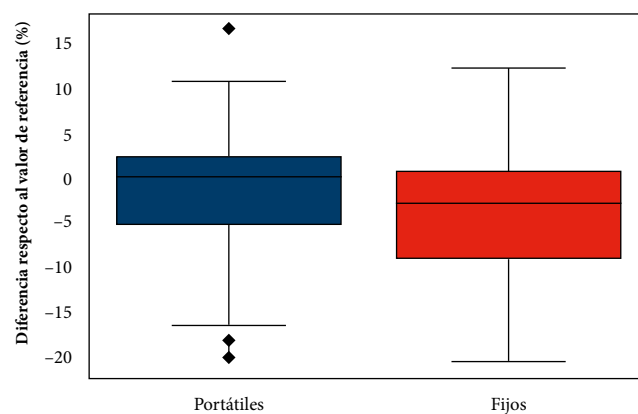


Figura 7. Distribución de los resultados de las medidas de tasa de dosis tomadas entre julio de 2017 y marzo de 2020 en los detectores portátiles y fijos

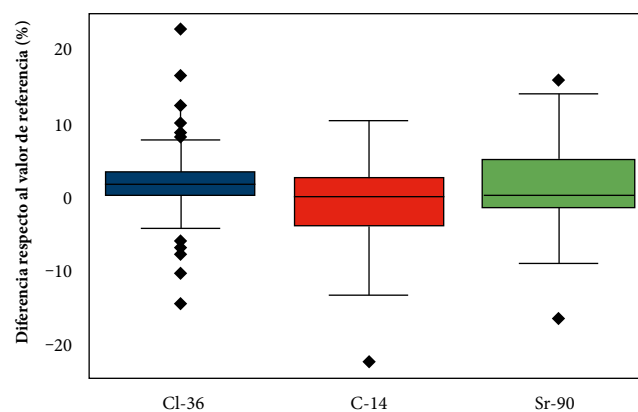


Figura 8. Distribución de los resultados de diferencias de contaminación superficial tomados entre julio de 2017 y marzo de 2020

En los equipos portátiles de medicina nuclear se evaluó la desviación estándar (DE) de las DP de los datos, en el caso de los equipos Fluke1 y C14, en los años 2018 y 2019. La totalidad de los valores obtenidos durante el presente estudio

(figura 6) mostraron que la DE en la totalidad de los datos es mayor que la DE de cada año, sin perder de vista que las verificaciones fueron realizadas por diferentes operadores cada año y esto pudo generar errores sistemáticos que pueden haber afectado la adquisición de los datos.

En la figura 7 se muestra la distribución de datos de los resultados encontrados desde julio de 2017 a marzo de 2020, correspondientes a las mediciones en la variación de la tasa de dosis de los equipos evaluados. El ancho de la caja muestra que el 50% de las medidas oscilan alrededor del valor medio, señalado con una línea dentro del cajón, y con una variación del 10%; los puntos fuera de las barras son valores atípicos que no aportan al análisis estadístico de las medidas. En dicha gráfica puede observarse que ningún valor supera en un rango del 20% el intervalo de tolerancia establecido. En la misma gráfica puede verse que la distribución es más angosta, y su mediana más cercana a cero, en los equipos portátiles que en los equipos fijos.

Finalmente, la figura 8 muestra la distribución de datos de los resultados encontrados desde julio de 2017 a marzo de 2020 en las mediciones de la variación de contaminación superficial de los equipos evaluados, donde el ancho de la caja muestra que el 50% de las medidas oscilan alrededor del valor medio señalado con una línea dentro del cajón, con una variación del 5%, y los puntos fuera de las barras representan valores atípicos que no aportan nada al análisis estadístico de las medidas. En dicha gráfica puede observarse que en ningún caso se supera en un rango del 20% el intervalo de tolerancia establecido.

4. Análisis

El PAC en el Servicio de Medicina Nuclear y el Servicio de Radiofarmacia vela por la seguridad del paciente y el trabajador ocupacionalmente expuesto, para lo cual toma como base el óptimo funcionamiento de todos los equipos que se utilizan en procesos relacionados con ambas partes. La importancia del Plan radica en la posibilidad de medir de forma cuantitativa y cualitativa el funcionamiento de dichos equipos, para garantizar la seguridad de todas las partes involucradas. Desafortunadamente, en los servicios en general se pierden de vista los equipos de apoyo, que garantizan el funcionamiento de los instrumentos que entran en contacto directo con el paciente; por esta razón, este estudio se enfocó

en detectores de radiación portátil y fijos de tipo GM y en cómo se puede realizar el seguimiento de las verificaciones funcionales de los mismos.

Buscando materializar ese seguimiento, se realizó un análisis histórico de las verificaciones funcionales de los detectores portátiles y fijos, tomando la tasa de dosis desde julio de 2017 a marzo de 2020 (figura 7). Estudiando el comportamiento de los datos, se concluyó que la distribución más angosta y su mediana son más cercanas a cero en los equipos portátiles que en los equipos fijos, ya que la reproducibilidad de los equipos portátiles es menor y su respuesta angular depende menos de la posición, así que es más fácil garantizar una geometría de medición más reproducible que en los equipos fijos. En el caso de los detectores de contaminación superficial (figura 8), se encontró una distribución más angosta que en las mediciones de tasa de dosis, gracias a la reproducibilidad en la geometría de medición, así como la relación espacial entre las emisiones de la fuente y la ventana del detector.

Aunque el seguimiento realizado a los equipos evidencia que no superan el intervalo de tolerancia, al analizar los resultados de la figura 6 queda en evidencia la dependencia del operador en la ejecución de las verificaciones, ya que cuando se analiza el total de los datos de hace evidente el error sistemático entre los operadores y cuando se hace el análisis anual, este error se elimina, quedando solo el error aleatorio intrínseco de las medidas; de modo que resulta notoria la necesidad de una estandarización más rigurosa del protocolo de las verificaciones para disminuir el valor promedio de las desviaciones en las lecturas de los detectores, minimizando así la dependencia de quien realiza las verificaciones, de modo que se pueda observar dicha reducción de la tolerancia en el seguimiento de los equipos.

5. discusión y conclusiones

Para una correcta implementación del PAC es imprescindible contar con un programa de seguridad y vigilancia radiológica de los equipos detectores de radiación que vele por la idoneidad de las medidas realizadas. Este programa debe incluir procedimientos de calibración, mantenimiento y realización de pruebas rutinarias de funcionamiento de los equipos. Para realizar estas pruebas, debe contarse con fuentes radiactivas selladas apropiadas y considerarse el

decaimiento propio de la fuente, así como la vida útil reportada por el fabricante a la hora de seleccionar las fuentes usadas.

La evaluación de las verificaciones funcionales realizadas entre el 2017 y marzo de 2020 muestran el comportamiento esperado en la reproducibilidad propia del equipo y las variaciones entre diferentes operadores. Para disminuir este último parámetro debe contarse con instrumentos que permitan garantizar la reproducibilidad en la geometría de medición, así como impartir capacitación periódica a los operadores para minimizar variaciones propias de la toma de datos experimentales; para ello, al protocolo ya construido por el Servicio de Medicina Nuclear y el Servicio de Radiofarmacia del INC se podrían agregar ayudas fotográficas y de video que especifiquen cómo se realiza el protocolo de verificación y la toma de los datos.

El comportamiento estable de los equipos también puede deberse a que estos no trabajan en ambientes adversos que podrían comprometer su funcionamiento; en el momento de realizar las medidas y en las actividades de trabajo, los equipos deben encontrarse en ambientes óptimos y controlados de operación.

Referencias

- [1] D. L. Bailey, J. L. Humm, A. Todd-Pokropek y A. van Aswegen (eds.), *Nuclear medicine physics: A handbook for teachers and students*. Viena: International Atomic Energy Agency, Viena, 2014. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1625324>
- [2] M. C. Sebastijan Rep, M. C. Attard, L. Camoni y A. Santos, *Quality control of nuclear medicine instrumentation and protocol standardisation. EANM Technologist's Guide*, p. 165, 2017 [Online]. Disponible en https://www.eanm.org/content-eanm/uploads/2017/11/EANM_2017_TechGuide_QualityControl.pdf
- [3] J. T. Bushberg, J. A. Seibert y E. M. Leidholdt, *The essential physics of medical imaging*, Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2010.
- [4] EANM, *Best practice in nuclear medicine: A technologist's Guide. Part 2*, pp. 1-48, 2007 [Online]. Disponible en https://www.eanm.org/content-eanm/uploads/2016/11/tech_best_practice2.pdf
- [5] Ministerio de Minas y Energía, Resolución 18-1434 de 2002. *Diario Oficial*, n.º 45027, p. 96, 2002.
- [6] Ministerio de la Protección Social, Decreto n.º 4725 de 2005, pp. 1-31, 2005.
- [7] J. S. Estrada Puerta y P. N. Cifuentes Rodríguez, *Gestión de mantenimiento de equipos médicos en la Fundación Clínica Infantil Club Noel: módulo de ingeniería biomédica*. Cali: Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de Ingeniería, 2011.
- [8] OMS, "Introducción al programa de mantenimiento de equipos médicos", serie de documentos técnicos de la OMS sobre dispositivos médicos, pp. 1-90, 2012 [Online]. Disponible en http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44830/1/9789243501536_spa.pdf
- [9] Ludlum Measurements Inc., "Model 14C: General purpose survey meter". [Online]. Disponible en <https://ludlums.com/products/all-products/product/model-14c>
- [10] Fluke Biomedical, "ASM-990 Series advanced survey meter", 2006. [Online]. Disponible en <https://www.flukebiomedical.com/sites/default/files/3129643c-en-asm-990-ds-w.pdf>
- [11] Rotem Industries Ltd., "The GM-42 Monitoring Channel – Rotem Radiation", 2020. [Online]. Disponible en <https://www.rotem-radiation.co.il/productmed/the-gm-42-monitoring-channel/>
- [12] Ludlum Measurements Inc., "Geiger counters for radiation detection | Thermo Fisher Scientific - Co", 2018. [Online]. Disponible en https://www.thermofisher.com/co/en/home/industrial/radiation-detection-measurement/portable-radiation-detection/next-generation-geiger-counters.html?gclid=EAIaIQobChMI6-jdt6Xz6gIVjYnICh0JUQ6tEAAYASAAEgJ2vPD_BwE&cid=cad_pai_SafetySecurity_adwords&ef_id=EAIaIQobChMI6-jdt6Xz6gIVjYnICh0JUQ6tEAAYASAAEgJ2vPD_BwE:-G:s&s_kwcid=AL3652!3!251726418238!p!!g!!ludlum (consultado el 29 de julio de 2020).
- [13] IAEA, "Livechart - Table of nuclides - Nuclear structure and decay data", 2020. [Online]. Disponible en <https://nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> (consultado el 29 de julio de 2020).
- [14] Técnicas Radiofísicas, "GM Rady - TRF", 2020. [Online]. Disponible en <http://trf.es/product-items/gm-rady/> (consultado el 29 de julio de 2020).

- [15] “Ludlum Model 44-25, Ludlum Measurements Inc., “Model 44-25 Alpha-Beta-Gamma Hand Monitor Detector”. 2016. [Online]. Disponible en <https://ludlums.com/products/all-products/product/model-44-25> (consultado el 29 de julio de 2020).
- [16] Cardinal Health, *Victoreen 190: Survey and count rate meter. Instruction manual*, 2004. [Online]. Disponible en <https://isurplus.com.au/manuals/Victoreen%20190%20Geiger%20Detector%20User%20Manual.pdf>
- [17] K. N. G. Rajan y K. N. G. Rajan, “Calibration of radiation monitoring instruments”, *Radiation Safety in Radiation Oncology*, pp. 199-218, 2018. <https://doi.org/10.1201/9781315119656-6>

Anexo 1

Formato para verificación funcional de los equipos

VERIFICACIÓN PARA LA FUNCIONALIDAD DE EQUIPOS DETECTORES DE RADIACIÓN IONIZANTE PARA LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA			
FECHA: dd-mm-aa			
FABRICANTE:		MODELO:	SERIE:
MODELO DETECTOR EXTERNO:		SERIE DETECTOR EXTERNO:	
LUGAR DE REALIZACIÓN DE LA VERIFICACIÓN:	USO: Dosímetro _____ Intensímetro _____ Contaminación _____		
PARÁMETROS POR VERIFICAR	RESULTADO	OBSERVACIONES	
REVISIÓN DE SEGUIMIENTO			
1. Fecha de último certificado de calibración			
2. Fecha de último mantenimiento realizado			
MEDICIONES AMBIENTALES			
1. Temperatura	Fecha:	Hora:	
2. Humedad	Fecha:	Hora:	
3. Presión	Fecha:	Hora:	
INSPECCIÓN FÍSICA			
1. Integridad física del detector			
2. Conexiones óptimas del detector			
3. Integridad de la pantalla del detector			
4. Nivel de batería			
5. Frotis (cps) < 2 veces el fondo radiactivo			
PRUEBA DE ESTABILIDAD EN TASA DE DOSIS	Fuente: _____		Serial: _____
1. Medida de la tasa de dosis @ 10 cm de la fuente de referencia (µSv/h)	Valor de referencia (µSv/h)		
	Medida (µSv/h)		
	Desviación (< 20% del valor de referencia)		
2. Alarmas sonoras y auditivas se activan al superar los niveles configurados			
PRUEBA DE ESTABILIDAD EN CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL	Fuente: _____		Serial: _____
1. Medida de actividad de la fuente de referencia	Actividad calculada		
	Actividad medida		
	Porcentaje de diferencia (< 20%)		
2. Las alarmas sonoras y auditivas se activan al superar los niveles configurados			
RESULTADO: _____			
REALIZADO POR:	Nombre _____	Firma _____	
REVISADO POR:	Nombre _____	Firma _____	
APROBADO POR:	Nombre _____	Firma _____	