

LA MEDIDA *IN VIVO* DE LA CONTAMINACIÓN INTERNA EN EL ORGANISMO



JUAN FRANCISCO NAVARRO AMARO

Unidad de Dosimetría de Radiaciones.
Responsable del Laboratorio del Contador de Radiactividad Corporal.
CIEMAT.

INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de la Dosimetría Interna nos encontramos en un área que exige la evaluación de las dosis recibidas por personas que han incorporado material radiactivo al organismo vía inhalación, ingestión, por inyección o a través de heridas. La exposición interna puede afectar a trabajadores expuestos, pero también a individuos de la población en el caso de que se den situaciones de emergencia nuclear o radiológica. La dificultad inicial en el cálculo de las dosis por contaminación interna radica en la imposibilidad de poder medirla directamente. Lo que sí se puede medir o estimar es la actividad retenida en el organismo (medida en el cuerpo entero o en órganos específicos) o la actividad en muestras biológicas (principalmente en excretas). A partir de dichas medidas y teniendo en cuenta el comportamiento metabólico del contaminante, se puede evaluar de forma retrospectiva, mediante modelos biocinéticos y dosimétricos, la actividad incorporada y las dosis internas resultantes [1].

En este trabajo nos centraremos en las medidas directas (in vivo) de la contaminación interna en el organismo humano. Recorriendo el laboratorio del Contador de Radiactividad Corporal del CIEMAT, iremos repasando los típicos sistemas de detección que se utilizan, las geometrías de medida más habituales, y los materiales (maniqués simuladores de órganos específicos o del cuerpo entero) utilizados para la calibración de los equipos..

MEDIDA *IN VIVO* DE LA CONTAMINACIÓN INTERNA

El Contador de Radiactividad Corporal

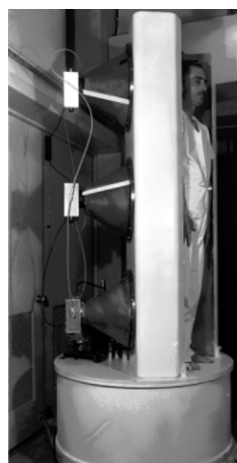
En el caso de la medida in vivo de la contaminación en un instante dado posterior a la incorporación, hay que tener en cuenta que, para la identificación y cuantificación del contaminante, éste tiene que ser emisor de radiación X o gamma de suficiente energía como para atravesar el cuerpo de la persona contaminada y llegar al sistema de detección. El Contador de Radiactividad Corporal (CRC) es la técnica de medida directa de la actividad de los radionucleidos internamente depositados en el organismo emisores de radiación

penetrante. En este término se incluye tanto la medida de la contaminación en cuerpo entero como la medida en determinados órganos específicos (pulmón, tiroides, huesos, etc.).

El contador de radiactividad corporal (CRC) como equipo de medida de la contaminación interna en el organismo humano, fue definiéndose gracias a los avances científicos en el campo de la detección de la radiación y al desarrollo de nuevos sistemas de medida durante la primera mitad del siglo XX. Aunque no puede atribuirse a un único inventor, su desarrollo fue



impulsado por científicos como Leonidas D. Marinelli (1950) que desarrolló y aplicó un contador de cuerpo entero de baja intensidad para medir a personas que habían sido inyectadas con radio en las décadas de 1920 y 1930, aquellas contaminadas por la exposición a explosiones atómicas y las expuestas accidentalmente en la industria y la medicina. Su contador de cuerpo entero se utilizó por primera vez en el Billings Hospital de la Universidad de Chicago en 1952 [2] [3].



El concepto de detección de radionucleidos en el cuerpo humano se basa en tecnologías previamente desarrolladas, como el contador Geiger-Müller, inventado por Hans Geiger y Walther Müller en 1928 [4], y los espectrómetros de centelleo desarrollados en la década de 1940 [5]. A partir de estos dispositivos, se construyeron sistemas de detección más avanzados, que permitieron medir la radiactividad interna en trabajadores expuestos y en víctimas de contaminación radiactiva. En esta línea, tenemos que destacar el CRC del Laborato-

rio Nacional de Los Álamos (LANL) que tiene sus raíces en los primeros años de la investigación nuclear en Estados Unidos. En abril de 1966, el especialista Philip Dean realizó una demostración de un contador de cuerpo entero en una sala blindada para la radiación natural. Este diseño sirvió como modelo para equipos similares que posteriormente se implementarían en otras instituciones [6].

En nuestro país, el crecimiento de la industria nuclear en la década de los 60 necesitaba una instalación centralizada que contribuyera a la vigilancia de los trabajadores expuestos que pudieran sufrir contaminación interna. Por otro lado, lo que realmente aceleró la construcción de dicha instalación fue el accidente ocurrido en Palomares en enero de 1966 [7]. La puesta en marcha del Contador de Radiactividad Corporal (CRC) de la Junta de Energía Nuclear (JEN) se hizo en un tiempo record y contó con el apoyo financiero de los americanos, fruto de los acuerdos bilaterales de cooperación entre ambos países en materia de seguridad y salud para usos civiles de la energía atómica [8]. Así nació el primer CRC en España cuyo fin principal era la mejora de las infraestructuras nacionales dedicadas a la protección del sector nuclear y minería e industria del uranio con riesgo de sufrir contaminación interna. Unos años más tarde, comienzan a dotarse las centrales nucleares españolas de CRC. La central nuclear de Garoña fue la primera en incorporar dicho equipo para la vigilancia de los trabajadores con riesgo de contaminación interna (1971). Actualmente hay 8 servicios de dosimetría interna autorizados en España por el CSN que disponen de CRC (CIEMAT, TECNATOM Westinghouse y las centrales nucleares de Garoña, Ascó, Vandellós II, Cofrentes, Almaraz y Trillo [9].

Sistemas de detección y blindajes

Los CRC utilizan básicamente sistemas de detección de radiación X/gamma acoplados a instrumentación electrónica, que procesa las señales generadas por la interacción de los fotones con el sistema de detección. El resultado de la medida es un espectro de energía, que se analiza utilizando técnicas de espectrometría gamma [10]. La selección del sistema de detección depende de los requisitos de sensibilidad, las energías de los fotones emitidos y la interferencia del fondo ambiental. Los detectores de centelleo de yoduro de sodio activado con talio (NaI(Tl)) y los detectores semiconductores de germanio de alta pureza (HPGe) son los sistemas de detección utilizados en la medida *in vivo*. Los detectores NaI(Tl) (**Figura 1a**) tienen una alta eficiencia de conteo para energías medias y altas, pero su resolución energética es baja en comparación con los detectores basados en semiconductores. Los detectores HPGe (**Figura 1b**) tienen una excelente resolución energética y una buena eficiencia de detección tanto en bajas como altas energías. En cualquier caso, la medida *in vivo* es una técnica rápida (los tiempos de recuento típicos oscilan entre 5 y 60 minutos) para evaluar la retención y el depósito de la Actividad (Bq) de los radionucleidos en el organismo.

En la medida *in vivo* no se puede pasar por alto la contribución del fondo ambiental. Es necesario controlar y reducir el fondo para mejorar la sensibilidad de detección. Incluso se debe tener en cuenta la propia radiactividad natural del cuerpo humano que en algunos casos puede interferir en la propia medida. Para reducir el fondo, los detectores suelen estar parcialmente blindados y/o colocados en una sala



Figura 1a. Detector de NaI(Tl) de la instalación.



Figura 1b. Detectores de Germanio de alta pureza.



Figura 2. Cámara blindada del Contador de Radiactividad Corporal. DPI-CIEMAT.

blindada de bajo fondo. Si se opta por la opción de la cámara blindada se puede utilizar acero “prenuclear” también llamado de bajo fondo, con paredes revestidas de plomo, o una combinación de plomo, cadmio y cobre para reducir el fondo proveniente de la radiación cósmica y de la fluorescencia de rayos X generada por los materiales del blindaje [10].

A modo de ejemplo, la cámara del CRC del CIEMAT construida en el año 1967 no ha sufrido apenas cambios (**Figura 2**). El blindaje de 210,82 x 215,9 x 241,3 cm y 37,2 toneladas de peso, está constituido por planchas de acero bajo fondo de 13 cm de espesor y planchas de 5 mm de plomo, 1 mm de cadmio y 1 mm de cobre. Se cuenta además con un sistema de ventilación forzada independiente que asegura la renovación del aire con el objetivo de eliminar al máximo la acumulación de gas radón con la consiguiente interferencia en las medidas sobre todo de sus descendientes (Pb-214, Bi-214, Pb-210).

Medida *in vivo* de la contaminación interna en el cuerpo entero

La medida *in vivo* de la contaminación en cuerpo entero se realiza en los casos en que el radionucleido incorporado pasa rápidamente al torrente sanguíneo. En este caso se puede asumir una distribución homogénea del contaminante en todo el organismo. Es el comportamiento metabólico de la mayoría de los productos de activación y fisión (Cs-137, Cs-134, Mn-54, Co-57...) y la mayoría de los radiofármacos (Lu-177, F-18, Tc-99, etc.). En cuanto a radionucleidos naturales, el K-40 emite fotones de 1.46 MeV y está presente en nuestro organismo en cantidades perfectamente medibles (entre 3 y 5 KBq). [11]

Para poder identificar y cuantificar los radionucleidos presentes en una persona contaminada, se requiere la calibración del sistema de detección. Para ello, se utilizan maniqués antropomórficos activos que simulan la contaminación del individuo. En el maniquí se distribuyen uniformemente fuentes o disoluciones radiactivas de actividad conocida, emisoras de fotones en el rango operativo del sistema de medida. En la imagen se muestran los maniqués más utilizados para la calibración en cuerpo entero: BOMAB phantom (**Figura 3a**) [12] e IGOR phantom (**Figura 3b**) [13].



Figura 3a. BOMAB phantom.



Figura 3b. IGOR phantom.



Figura 4a. Detector Nal(Tl).



Figura 4b. Contador rápido (Canberra Inc.).

En la imagen se muestran los sistemas de detección del CRC del CIEMAT para la medida en cuerpo entero en el interior de la cámara blindada (**Figura 4a**) y el contador rápido (**Figura 4b**).

Medida *in vivo* de la contaminación interna en órganos específicos

En los casos en que el radionucleido se deposita preferentemente en un determinado órgano, se debe realizar la medida de manera parcial, focalizando en la zona que mejor cubra el tejido y a ser posible más aislada del resto de órganos. A continuación, presentaremos los procedimientos más habituales.

- Determinación de I-131 en tiroides

El yodo 131 (I-131) es un radionucleido de alta volatilidad que se deposita preferentemente en la glándula tiroidea. Por ello, la medida *in vivo* en el tiroides es el procedimiento recomendado para la determinación de este radionucleido tanto en

trabajadores expuestos como en individuos de la población que hayan sufrido exposición en situaciones de emergencia nuclear o radiológica. Para su medida, se utilizan habitualmente detectores de centelleo (Nal(Tl)) cuya resolución en energía es suficiente para la vigilancia rutinaria ocupacional. Sin embargo, en escenarios de contaminación complejos donde se liberan muchos radionucleidos cuyas emisiones gamma pueden interferir entre sí, el análisis cualitativo y cuantitativo se puede complicar (p.ej. accidente de FUKUSHIMA). En estos casos, los detectores HPGe pueden mejorar la evaluación de las incorporaciones, debido a su excelente resolución energética.

En cualquier caso, los detectores deben estar adecuadamente calibrados, utilizando maniqués que simulen el cuello y tiroides contaminado (se utilizan disoluciones de I-131 o Ba-133 y Cs-137 como simulador del yodo radiactivo).

La mayoría de los laboratorios utilizan maniqués tiroideos



Figura 5a. Sistemas de detección (CIEMAT) para la determinación de I-131 en tiroides.



Figura 5b. Familia de maniqués tiroides (hombre y mujer; 1,5,10 y 15 años).

que simulan adultos y que son suficientes para la vigilancia ocupacional [14]. Sin embargo, debido a la significativa variación en el tamaño de la glándula tiroides en niños y adultos se recomienda el uso de maniqués diseñados para diferentes grupos de edad con el fin de reducir las incertidumbres de medida y así mejorar el cálculo de dosis en situaciones en las que haya exposición de la población [15].

En las **Figuras 5a y 5b** se muestran los procedimientos de medida in vivo de I-131 en tiroides implementados en el CRC del CIEMAT y los novedosos maniqués tiroideos de calibración dependientes de la edad desarrollados para mejorar la respuesta en situaciones de exposición de la población [16].

- Medida in vivo de actínidos en pulmón

Algunos actínidos como el americio o el uranio se suelen incorporar al organismo principalmente por inhalación, con largos tiempos de residencia en el pulmón. Los radionucleidos de estos elementos generalmente tienen una alta radiotoxicidad y la sensibilidad de los detectores debe permitir realizar la medida de sus emisiones fotónicas, que suelen ser rayos X de baja energía y baja intensidad de emisión. No siempre se cumple este requisito y por ello en estos casos las técnicas de medida in-vitro son las más recomendadas debido a su mejor sensibilidad, aunque para obtener un resultado fiable de la medida pueden transcurrir semanas.

La ventaja que puede ofrecer la medida en pulmón es la rapidez de la obtención del resultado, aunque la sensibilidad de medida no permita estimar dosis efectivas comprometidas por debajo de decenas de milisieverts. Por ello, la medida in vivo se deberá complementar con la medida in vitro de mayor sensibilidad.

Los sistemas utilizados para la medida pulmonar están basados en detectores HPGe que presentan una alta eficiencia

de detección y excelente resolución a bajas energías (10 keV-1000 keV). En cuanto a la calibración pulmonar, debido a la fuerte atenuación que sufren los fotones de baja energía en los tejidos, se deben utilizar maniqués antropomórficos muy realistas para simular los diferentes tejidos (músculo, grasa) y órganos (pulmón, hueso, hígado) así como diferentes grosores de la pared torácica del individuo.



Figura 6. Medida in vivo para la determinación de actínidos en pulmón. CRC-Ciemat.

En la imagen (**Figura 6**) se muestra el sistema de detección del CRC del CIEMAT. Único sistema a nivel nacional para la medida de actínidos en pulmón y americio en hueso.

En la imagen (**Figura 7a**) se muestra el maniquí de tórax LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) que simula las características anatómicas de un hombre occidental y el maniquí de torso JAERI (Japanese Atomic Energy Research Institute) (**Figura 7b**) ideal para simulación del hombre asiático.



Figura 7a. Maniquí de tórax LLNL.



Figura 7b. Maniquí de tórax JAERI.

- Determinación de Am-241 en hueso

La principal energía del Am-241 es 59,5 keV, con una intensidad de emisión de un 36%. Dichos fotones tienen suficiente energía para ser detectados mediante medidas pulmonares e incluso en otros órganos de mayor densidad como el hueso. En situaciones de exposición crónica o mucho tiempo después de una incorporación aguda, el americio se va depositando en hueso. Así, la evaluación de la dosis interna se puede realizar estimando el contenido total de actividad de este elemento en zonas aisladas con gran contenido óseo (cráneo o rodilla) y a continuación calcular la actividad total en esqueleto. La calibración se realiza con maniquíes que simulen la contaminación en cráneo o rodi-

lla. El CRC del CIEMAT ha implementado procedimientos de medida de americio en hueso, únicos a nivel nacional. En la imagen (**Figura 8a**) se muestra la geometría de medida en cráneo y el maniquí desarrollado en el New York Medical Center de EEUU hecho de capas de parafina y escayola para simular, respectivamente, los tejidos blandos y el hueso de una cabeza humana. En las capas intermedias de escayola se distribuye uniformemente 1 kBq de Am-241. En la imagen (**Figura 8b**) se muestra la geometría de medida en rodilla y el maniquí desarrollado en la Universidad de Cincinnati (EEUU) que utiliza un material plástico de poliuretano equivalente a músculo y un conjunto de simuladores de huesos (fémur, rótula, tibia y peroné removible) con 34 kBq de Am-241 distribuidos homogéneamente en ellos [17][18].



Figura 8a. Maniquí "Cohen" NYM center.



Figura 8b. Maniquí "Spitz" U. Cincinnati.

CONTROL DE CALIDAD EN LOS LABORATORIOS DE MEDIDA IN VIVO

Una parte esencial en operativa de los CRC es el aseguramiento de la calidad, es decir, garantizar que los ensayos cumplen normas internacionales con requisitos técnicos y de gestión que garantizan la competencia técnica. Los laboratorios de medida in vivo en nuestro país pertenecen a servicios de dosimetría personal interna autorizados por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). A su vez, tanto el servicio de dosimetría interna del CIEMAT como el de TECNATOM Westinghouse están acreditados por ENAC (Entidad Nacional de Acreditación) según la Norma ISO/IEC 17025 [19] para sus procedimientos de medida in vivo e in vitro y para la estimación de dosis efectiva comprometida [20]. Uno de los principales requisitos de la calidad es la participación en campañas de intercomparación entre laboratorios. En esta línea, en nuestro país, el CRC del CIEMAT viene

actuando como laboratorio de apoyo en las campañas de intercomparación nacional de contadores de radiactividad corporal organizadas por el CSN con el propósito de asegurar la competencia técnica y armonizar los procedimientos de medida in vivo a nivel nacional de todos los servicios de dosimetría interna del país.

REFERENCIAS

- [1] ICRP, Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1-5., in ICRP Publication 130. 2015.
- [2] Marinelli, L.D. 1956. The use of Na-Tl crystal spectrometers in the study of gamma-ray activity in vivo: Brit. Journ. of Radiol. Supplement 7 (Nov.): 38-43. (London Brit. Inst. Of Radiology).
- [3] May, H.A. and L.D. Marinelli. 1962. Sodium Iodide Systems: Optimum crystal dimensions and origin of back-

- ground. Proceedings of the Symposium on Whole Body Counting, IAEA, Vienna (June 12–16): 15–36.
- [4] Geiger, H.; Müller, W. (1928). Electron counting tube for measurement of weakest radioactivities . doi:10.1007/BF01494093.
- [5] Detectors in nuclear science Ed. D.A. Bromley Nuclear Instruments and Methods, Vol. 162 N2 1-3, Partes I y II (1979).
- [6] Purdue Cytometry Volume 10, 2007, MMK Holdings, Ltd. Publisher J. Paul Robinson for the Purdue University Cytometry Laboratories, West Lafayette, IN, 47907-2057, ISBN 978-1-890473-10-5.
- [7] C. Sancho et al., Palomares (Spain): A historical review., (CIEMAT), Journal of Environmental Radioactivity 203 (2019) 55–70.
- [8] J.A. Hall (atomic energy commission). J.M.Otero (J.E.N.) 1966. Collaboration in the fields of health and safety in accordance with the agreement for cooperation for civil uses of atomic energy between Spain and USA.
- [9] Cuadernos para una Historiografía de la Protección Radiológica en España (Dosimetría Interna. Ciemat y Sector Nuclear). <https://www.sne.es/publicaciones/biblioteca>.
- [10] ICRU Report 69 Direct Determination of the Body Content of Radionuclides January 2003 Edition: ISSN 1473-6691.
- [11] EC, Directorate-General for Energy, Technical recommendations for monitoring individuals for occupational intakes of radionuclides, 2018, <https://data.europa.eu/doi/10.2833/393101P3>.
- [12] Health Physics Society. Specifications for the Bottle Manikin Absorber Phantom. An American National Standard. New York: American National Standards Institute; ANSI/HPS N13.35; 1995.
- [13] Kovtun et al. Metrological parameters of the unified calibration whole-body phantom with gamma-emitting radionuclides. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a033071.
- [14] ANSI/HPS N13.44 2014 Edition, 2014. Thyroid Phantom Used in Occupational Monitoring.
- [15] J.F. Navarro et al., EURADOS intercomparison of age-dependent thyroid phantoms for thyroid monitoring in nuclear or radiological emergencies, Radiation Physics and Chemistry, Volume 224, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111978>.
- [16] B. Pérez López, J. F. Navarro, M. A. López Ponte. Methodology at Ciemat Whole Body Counter for in vivo monitoring of radioiodine in the thyroid of exposed population in case of nuclear emergency Radiation. <http://doi:10.1093/rpd/ncy045>.
- [17] M. Moraleda, J.F. Navarro. A numerical method for the calibration of a whole body counter. application to in vivo measurements of Am-241 in skull. Health Physics 2003-06-01.
- [18] J.F. Navarro et al, Assessment of the internal dose of Am-241 in bone by in vivo measurements of activity deposited in knee . Radiation Protection Dosimetry, Volume 127, Issue 1-4, Nov 2007. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm411>.
- [19] International Organization for Standardization and the International Electrotechnical Commission. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. ISO/IEC 17025:2017 (ISO: Geneva) (2017).
- [20] M.A, López et al, The challenge of CIEMAT Internal Dosimetry Service for accreditation according to ISO/IEC 17025 Std, for in vivo and in vitro monitoring and dose assessment of internal. Radiation Protection Dosimetry, Volume 170, Issue 1-4, September 2016, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv38>. ■