

Una mirada actualizada a las dificultades en la implementación y diseminación de los patrones dosimétricos secundarios

 Gonzalo Walwyn Salas¹,  Oscar Díaz Rizo²,  Niurka González Rodríguez¹

¹ Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR). La Habana, Cuba

² Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC). Universidad de la Habana. La Habana, Cuba
gonzalo@cphr.edu.cu

Resumen

Un elemento básico para lograr la trazabilidad de las mediciones es la correcta implementación y diseminación de los patrones de medición. En el caso de la dosimetría, existen métodos armonizados de calibración a nivel internacional, sin embargo pueden presentarse dificultades en su introducción relacionadas con las características técnicas de los patrones y con los métodos descritos en los documentos técnicos. El uso de sistemas dosimétricos disponibles comercialmente como patrones secundarios impone un estudio personalizado de sus características técnicas. Los métodos recomendados no siempre se ajustan a la infraestructura disponible y se necesita entonces hacer modificaciones. En el artículo se realiza un análisis crítico de la implementación de patrones dosimétricos secundarios en el ámbito internacional a partir de las dificultades identificadas.

Palabras clave: dosimetría; calibración; patrones de calibrado; protección contra las radiaciones; radioterapia; detectores de radiaciones.

An updated overview at the difficulties in the implementation and dissemination of the dosimetry secondary standards

Abstract

A basic element to achieve the measurement traceability is the correct implementation and dissemination of the measurement standards. In the case of dosimetry, there are internationally harmonized calibration methods; however difficulties may arise in their introduction related to the technical characteristics of the standards and the methods described in the technical documents. The use of commercially available dosimetry systems as secondary standards requires the personalized studies of their technical characteristics. The recommended methods do not always compatible with the available infrastructure and modifications are needed. The article makes a critical analysis of the implementation of the dosimetry secondary standards in the international arena based on the identified difficulties.

Key words: dosimetry; calibration; calibration standards; radiation protection; radiotherapy; radiation detectors.

Introducción

La metrología es la ciencia de las mediciones y sus aplicaciones [1]. En el mundo actual la calidad se construye y se diseña bajo requisitos que se documentan en normas y se comprueban mediante mediciones. En dependencia del campo de aplicación se identifican tres ramas de la metrología, la científica, la industrial y la legal. Parte importante en la misma es la trazabilidad metrológica que implica el establecimiento de una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de la medición. Un elemento básico para lograr la menciona-

da trazabilidad de las mediciones es la correcta implementación y diseminación de patrones de medición los cuales son la realización de la definición de una magnitud dada. Existen muchos factores que pueden afectar dicha cadena de trazabilidad y uno de ellos puede ser la irrupción de nuevas tecnologías en las cuales las mediciones necesarias no puedan ser comparadas con los patrones o porque los requisitos de incertidumbre de las mediciones a esos niveles no pueden ser asegurados.

La incertidumbre de las mediciones es parte fundacional de la metrología. Esta tiene varios métodos para su cálculo por lo que el resultado de una medición puede tener diferentes estimaciones de la incertidumbre si se realiza

por diferentes métodos. Para cada campo de uso de la instrumentación dosimétrica se determinan patrones que logren asegurar una trazabilidad metrológica adecuada de las mediciones según el campo de aplicación de las mismas y que cumplan con las expectativas de los usuarios. La investigación de los elementos que pueden estar afectando de manera sistemática las mediciones a todos los niveles puede ser de gran utilidad para la reducción de las incertidumbres y por consecuencia para la mejoría de la trazabilidad metrológica.

En el presente trabajo se realiza un análisis crítico de la implementación de patrones dosimétricos en el ámbito internacional y nacional a partir de las dificultades que pueden encontrarse relacionadas con las características de los patrones secundarios y los métodos de diseminación.

Dificultades relacionadas con las características de los patrones dosimétricos secundarios

Existen normas internacionales que refieren las características y los métodos de determinación de la conformidad de los instrumentos de referencia [2, 3, 4, 5]. Estos instrumentos son principalmente cámaras de ionización de diferentes tipos por lo que este principio de medición será el fundamental para la dosimetría de referencia a niveles secundarios.

A pesar de estar normalizada la fabricación de las cámaras de ionización se pueden encontrar problemas en el momento de la medición. El volumen de la cavidad de la cámara constituye un compromiso entre la necesidad de contar con suficiente sensibilidad y la capacidad de medir en un punto. Durante el uso, la cámara debe alinearse de forma tal que la fluencia de la radiación sea aproximadamente uniforme en toda la sección transversal de la cámara. Por lo tanto, la longitud de la cavidad de la cámara impone un umbral para el tamaño del campo en el que pueden ser realizadas las mediciones. La respuesta de la cámara de ionización para diferentes tamaños de campo puede variar por lo que es un elemento que debe ser evaluado con precisión si el patrón secundario va a ser usado en condiciones diferentes a las que fue calibrado.

Las cámaras de ionización con paredes de grafito usualmente tienen mejor estabilidad a largo plazo y una respuesta más uniforme que las cámaras con paredes de plástico; las cuales son más robustas y por consiguiente más adecuadas para las mediciones de rutina. La humedad del aire, por otra parte, puede afectar la respuesta de la cámara, especialmente para las cámaras con paredes de Nylon o de A-150. Debido a que una cámara de ionización es un instrumento de alta precisión, debe prestarse atención para adquirir un tipo de cámara cuyo desempeño haya sido suficientemente probado en haces para los cuales van a ser usados. Comúnmente los requisitos de estabilidad a largo plazo de las cámaras se definen por los fabricantes para 1 año [2-4], Es necesario considerar que algunos problemas de fabricación pueden traer problemas de inestabilidad como los detectados en cámaras de ionización [6]. Teniendo en cuenta estas dificultades que pueden encontrarse con la fabricación de dosímetros se hace necesario hacer énfasis en el chequeo de la estabilidad de los mismos en 1 año para corroborar si

cumplen con los requisitos internacionales de fabricación [2-4]. En el caso de los patrones secundarios, estos deben ser usados por períodos de 3 a 5 años hasta su recalibración, por lo que el cumplimiento de este requisito de fabricación no es suficiente y entonces se hace necesario investigar si este requisito de estabilidad se cumple para estos plazos prolongados.

La construcción de la cámara debe ser lo más homogénea posible; pero por razones de orden técnico, el electrodo central es de un material distinto al de las paredes. En realidad, la elección de los materiales puede desempeñar un papel importante en lo que respecta a asegurar que la respuesta energética de la cámara no varíe considerablemente. Un patrón secundario tiene que mantener una adecuada respuesta energética en su rango de uso pero no basta con que estas características sean mencionadas en un manual sino que deben ser confirmadas en un laboratorio. Si se pretende calibrar otros instrumentos con dicho patrón entonces el mismo, de manera general, debe estar calibrado en la calidad de radiación de interés.

Dificultades en la implementación y diseminación de patrones dosimétricos secundarios

Un patrón de medición es la realización de la definición de una magnitud, con un valor determinado y una incertidumbre de medición asociada [1]. La elección, reconocimiento, uso, conservación y documentación de un patrón de medición se conduce por reglas descritas en un documento internacional de la OIML [7] aunque, dicho documento es una recomendación general que puede ser usado para patrones secundarios y no se refiere a patrones primarios, ni nacionales, ni incluye especificidades para cada campo de la metrología. Los patrones primarios son únicos y están fabricados por los laboratorios primarios, sus diseños son especialmente concebidos para la realización de la magnitud dosimétrica por lo que sus características y correcciones específicas tienen que ser publicadas en la literatura científica [8, 9, 10].

Los patrones secundarios generalmente son instrumentos de referencia disponibles comercialmente. La determinación del estatus de patrón secundario comienza por la calibración con respecto a un patrón primario en condiciones normalizadas. En ocasiones puede ser calibrado contra un instrumento intermedio de reconocida calidad metrológica calibrado contra un patrón primario, como por ejemplo el patrón internacional del OIEA quien calibra los patrones de la red de LSCDs.

La adquisición de estos instrumentos de manera comercial deduce un comportamiento de los mismos según las normas internacionales en condiciones normalizadas de calibración. Los ensayos de aprobación de modelo solo se hacen a los prototipos de instrumentos que incluye un número reducido de estos, así pues las características individuales de los que se compran no son ensayadas dado que se confía en las buenas prácticas de producción del fabricante, que generalmente es de un conocido prestigio. La implementación

de dicho instrumento como patrón debe incluir entonces los aspectos recomendados por la OIML [7] y de manera específica para dosimetría de las radiaciones ionizantes se siguen en muchos casos las recomendaciones del OIEA [11- 14]. Estos documentos técnicos son actualizados periódicamente debido al continuo desarrollo de las tecnologías de radiación y de los detectores usados para la medición.

Como parte de la implementación de patrones se necesita del establecimiento de condiciones normalizadas de calibración donde se pueda reproducir la magnitud dosimétrica de interés. En dosimetría se necesitan de instalaciones altamente especializadas y costosas donde se instalan los irradiadores, bancos de calibración, sistemas de medición, de posicionamiento y de seguridad, etc.; de acuerdo a criterios establecidos internacionalmente [15]. Los haces de radiación fotónica son producidos tanto por fuentes radiactivas contenidas en irradiadores como por equipos de rayos X de bajas, medias y altas energías. Específicamente los de altas energías son producidos por los aceleradores lineales de partículas. Para conocer las características de estos haces se tienen que hacer un sinnúmero de mediciones que se describen en varias normas internacionales según el tipo de instrumento a calibrar [16, 17, 18]. Igualmente el OIEA agrupa dichas recomendaciones en sus documentos técnicos [11, 12, 13, 14, 15] que actualiza periódicamente para hacer más viable la asimilación por sus estados miembros. Dichos documentos también refieren los métodos de calibración que son elementos esenciales en la disseminación de los patrones a través de la cadena de trazabilidad metrológica que relacionan un resultado de medición con una referencia.

A pesar de existir documentos técnicos normativos y recomendatorios que describen los métodos de calibración y verificación pueden encontrarse dificultades en la implementación práctica. Por ejemplo en braquiterapia, se han seguido desarrollado varios protocolos dosimétricos ajustados [19-23] a las necesidades de los países que lo implementan pero necesitan ser armonizados para un uso generalizado. El método más usado internacionalmente [24] es el recomendado por el OIEA [14] pero se basa en las fuentes que estaban en uso hasta el momento de emisión de este documento técnico. Gran parte de los patrones dosimétricos secundarios que están disponibles se basan principalmente en sistemas constituidos por cámaras de pozo, electrómetros y fuentes de ^{137}Cs de baja tasa de dosis, no obstante, las fuentes más usadas en la práctica clínica son de ^{192}Ir y ^{60}Co , así como los equipos de carga remota con fuentes de altas tasas de dosis para los cuales muy pocos laboratorios pueden ofrecer calibraciones de la instrumentación dosimétrica en esas condiciones. Considerando que los laboratorios primarios no cubren las particularidades de todos los tipos de fuentes y la poca disponibilidad de estos servicios a nivel internacional, se hace muy difícil el acceso a servicios de calibración que se adapten a las necesidades de cada país. Por otro lado, no existen protocolos dosimétricos armoni-

zados en todo el mundo lo que hace que sea más compleja la elección de los esquemas de disseminación [24].

El grado de implementación y disseminación de los patrones de kerma en aire y dosis absorbida en agua en haces de radioterapia externa con ^{60}Co es elevado a nivel internacional [25] y en nuestro país [26] también, pero, con la introducción de nuevas tecnologías en base a aceleradores lineales su disseminación ha empezado a presentar algunas dificultades. Las técnicas de radioterapia de intensidad modulada, radioterapia guiada por imágenes, radiocirugía estéreo-táctica y otras requieren del uso de campos de radiación pequeños y conformados de forma dinámica que se alejan de las condiciones de referencia establecidas en el laboratorio. Muchas publicaciones [27, 28, 29] han demostrado la incompatibilidad de los protocolos dosimétricos convencionales [30] en estas condiciones. Efectos como la perturbación causada por la densidad de la cavidad de la cámara, la promediación de la dosis en el volumen de la cámara, de conjunto con la ineficacia del equilibrio de las partículas cargadas parecen ser los principales responsables del fallo de los protocolos dosimétricos establecidos. Afortunadamente se ha trabajado aceleradamente en la búsqueda de nuevos protocolos dosimétricos [31] que recientemente han sido concretados como un código de práctica para campos estáticos [32]. No obstante, la implementación de este código de práctica, como cualquier otro, debe ser evaluada en cada país por lo que los laboratorios deberán investigar en mecanismos de confirmación metrológica de estos protocolos que brinden a la comunidad físico – médica mayor seguridad en su aplicación. Por otro lado, se necesita desarrollar otro protocolo para campos dinámicos y actualizar el TRS 398 [30] debido al uso de nuevos detectores en la práctica médica y cambios en datos de las magnitudes fundamentales [33] que impactan en la realización de la unidad Gray de los laboratorios primarios.

En el caso de los patrones usados en haces de rayos X de energías medias y bajas el grado de implementación es menor. Para estas aplicaciones la red del OIEA/OMS aún no ha establecido programas de ensayos de aptitud como es en el caso de haces de ^{60}Co . Este elemento constituye una desventaja a la hora de evaluar el desempeño del laboratorio en la reproducción de la magnitud. Algunos laboratorios, como el de Cuba, han buscado alternativas de comparaciones bilaterales y en otras organizaciones metrológicas [34] pero se tiene que señalar que no es una práctica internacional generalizada, ni sistemática.

En el campo de la radiología diagnóstica ya han sido probadas las metodologías recomendadas de calibración y disseminación a escala internacional [35], sin embargo, no siempre se adecuan a las situaciones prácticas de los laboratorios de calibración. Tal es el caso de la mamografía donde los haces de calibración recomendados se basan en equipos de rayos X con ánodo de molibdeno, sin embargo es poco frecuente encontrar un laboratorio con equipos de este tipo. La mayoría de los equipos de rayos X disponibles en los laboratorios tienen ánodos de tungsteno por lo que se hace difícil la

calibración de dosímetros en las condiciones recomendadas. El uso de calidades de radiación alternativas en base a ánodos de tungsteno ya está siendo establecido por varios laboratorios [36-38] los cuales han realizado comparaciones de primer nivel [34, 39-43] que crean las condiciones para una estandarización de estas calidades alternativas. No obstante, estos trabajos se basan en mediciones con patrones en base a cámaras de ionización que por lo general tienen muy buena respuesta energética en el rango de mamografía. En la práctica clínica son muy usados dosímetros semiconductores que tienen una dependencia energética más pronunciada y por tanto, pueden cambiar mucho su respuesta respecto a las calidades de radiación alternativas [44]. La generalización del uso de dichas calidades tendrá, entonces, que esperar por mayores investigaciones sobre la dependencia energética de los semiconductores disponibles en la actualidad y la inclusión de las calidades alternativas en el código de práctica [13].

Para la diseminación de patrones dosimétricos a niveles de protección radiológica se debe tener en cuenta que las calibraciones se realizan generalmente en campos de radiación continua y en la actualidad están en uso muchos campos pulsados de radiación en las técnicas de radiología diagnóstica y radioterapia. Se ha demostrado que muchos dosímetros no funcionan adecuadamente en estos campos [45] por lo que se debe asistir a los usuarios finales en su correcto uso [46]. Para la calibración en campos pulsados de radiación han empezado a crearse condiciones de referencia [47] pero aún son muy pocas capacidades para un uso generalizado de las mismas. Otros instrumentos han traído confusiones en su uso por los usuarios porque miden en magnitudes operacionales pero su uso es con fines de detección de material nuclear en fronteras por lo que están sometidos a otras normas de fabricación con requerimientos metrología diferentes a los comunes [48].

Conclusiones

Para la implementación y diseminación de patrones dosimétricos existen metodologías armonizadas a nivel internacional, pero pueden presentarse dificultades en su introducción relacionadas con las características técnicas de los patrones y con los métodos de calibración descritos en los documentos técnicos que entorpecen el correcto establecimiento de los esquemas de trazabilidad metrología. Los métodos recomendados no siempre se ajustan a la infraestructura con que cuentan los laboratorios por lo que se deben estudiar métodos alternativos que deben ser validados y que arrojen resultados similares a los establecidos. Los métodos de calibración en braquiterapia de altas tasas de dosis y mamografía necesitan ser modificados, mientras que en radioterapia externa y protección radiológica se necesita evaluar la efectividad de los métodos existentes con el continuo desarrollo de las tecnologías de radiación y de los detectores usados para la medición.

El uso de sistemas dosimétricos disponibles comercialmente como patrones impone un estudio persona-

lizado de sus características técnicas, más allá de la calibración, que permita mantenerlo bajo control y se eviten errores sistemáticos que afecten la exactitud de las mediciones de referencia. Características de las cámaras de ionización como la respuesta en condiciones diferentes a aquellas en la que fue calibrada, la estabilidad a un plazo de 3 a 5 años y la dependencia energética, entre otras, pueden ser investigadas con mayor profundidad de ser necesario.

Referencias bibliográficas

- [1]. REYES PONCE Y. Metrología General. Fundamentos de metrología. Capítulo 1. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2014. Parte I. p.1-21.
- [2]. International Electrotechnical Commission (IEC). Medical electrical equipment -dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy. IEC 60731. Edition 3.0. Geneva, 2011.
- [3]. International Electrotechnical Commission (IEC). Medical electrical equipment - dosimetric instruments as used in brachytherapy. Part 1: Instruments based on well-type ionization chambers. IEC 62467-1. Edition 1.0. Geneva, 2009.
- [4]. International Electrotechnical Commission (IEC). Medical electrical equipment - medical electrical equipment – dosimeters with ionization chambers and/or semiconductor detectors as used in X-ray diagnostic imaging. IEC 61674. Edition 2.0. Geneva, 2012.
- [5]. International Organization for Standardization (ISO). X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 2: Dosimetry for radiation protection over energy ranges 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV. ISO 4037-2. Geneva, 1997.
- [6]. PTW. Long-term stability of PTW farmer type ionization chambers. PTW Technical Note D165.200.0/2. Freiburg: PTW, 1998.
- [7]. International Organization of Legal Metrology (OIML). Measurement standards. Choice, recognition, use, conservation and documentation. OIML D8. Paris, 2004.
- [8]. BÜERMANN L & BURNS DT. Air-kerma cavity standards. Metrología. 2009; 46(2).
- [9]. BURNS DT & BÜERMANN L. Free-air ionization chambers. Metrología. 2009; 46(2).
- [10]. SEUNTJENS J & DUANE S. Photon absorbed dose standards. Metrología 2009; 46(2).
- [11]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Calibration of dosimeters used in radiotherapy. Technical Report Series 374. Vienna: IAEA, 1999.
- [12]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Calibration of radiation protection monitoring instruments. Safety Report Series No. 16. Vienna: IAEA, 2000.
- [13]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Dosimetry in diagnostic radiology: an international code of practice. Technical Report Series 457. Vienna: IAEA, 2007.
- [14]. Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Calibración de fuentes de fotones y rayos beta usadas en braquiterapia. Guía de procedimientos estandarizados en Laboratorios Secundarios de Calibración Dosimétrica (LSCD) y en hospitales. IAEA-TEC-DOC- 1274/S. Viena: OIEA, 2004.
- [15]. International Atomic Energy Agency (IAEA). SSDL network charter. The IAEA/WHO network of secondary standards dosimetry laboratories. Second edition. Vienna: IAEA, 2018.
- [16]. International Organization for Standardization (ISO). X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 1: Radiation characteristics and production methods. ISO4037. Geneva, 1996.
- [17]. Bureau International de Poids et Mesures (BIPM). Qualité de rayonnement. CCEMRI. Section I Rayons x et γ , electrons. 2me réunion, 1972. Page R15 - first - R16 .
- [18]. International Electrotechnical Commission (IEC). Medical diagnostic X-ray equipment. Radiation conditions for use in determination of characteristics. IEC 61267. Geneva, 2005.
- [19]. AWUNOR OA, LECOMBER AR, RICHMOND N, WALKER C. A practical implementation of the 2010 IPEM high dose rate bra-

- chytherapy code of practice for the calibration of 192Ir sources. *Phys. Med. Biol.* 2011; 56(16): 5397-5410.
- [20]. CARLSSON TEDGREN A, GRINDBORG JE. Audit on source strength determination for HDR and PDR 192Ir brachytherapy in Sweden", *Radiother. Oncol.* 2008; 86(1): 126-130.
- [21]. VAN DIJK E, KOLKMAN-DEURLOO, IK, DAMEN PM. Determination of the reference air kerma rate for 192Ir brachytherapy sources and the related uncertainty. *Med. Phys.* 2004; 31(10): 2826-2833.
- [22]. STUMP KE, DEWERD LA, MICKA JA. ANDERSON DR. Calibration of new high dose rate 192Ir sources. *Med. Phys.* 2002; 29(7): 1483-1488.
- [23]. NATH R, et. al. Code of practice for brachytherapy physics: report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 56. American Association of Physicists in Medicine. *Med. Phys.* 1997; 24(10): 1557-1598.
- [24]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Status of brachytherapy dosimetry and the need for the development of an international protocol. *SSDL Newsletter*. Vol. 2, No.62, IAEA, Vienna (2013).
- [25]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Implementation of the international code of practice of dosimetry in radiotherapy (TRS 398): review of testing results. IAEA-TECDOC-1455. Vienna: IAEA, June 2005.
- [26]. WALWYN G, GUTIERREZ S. Development and prospects on dosimetry at radiotherapy levels in the secondary dosimetry laboratory of Cuba. XI International IRPA Congress. España. Mayo, 2004.
- [27]. LAUB WU, WONG T. The volume effect of detectors in the dosimetry of small fields used in IMRT. *Med. Phys.* 2003; 30(3): 341-347.
- [28]. BOUCHARD H, SEUNTJENS J. Ionization chamber-based reference dosimetry of intensity modulated radiation beams. *Med. Phys.* 2004; 31(9): 2454-2465.
- [29]. DAS IJ, DING GX, AHNESJÖ A. Small fields: nonequilibrium radiation dosimetry. *Med. Phys.* 2008; 35(1): 206-215.
- [30]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry. Technical Report Series 398. Vienna: IAEA, 2000.
- [31]. ALFONSO R, ANDREO P, CAPOTE R, et. al. A new formalism for reference dosimetry of small and nonstandard fields. *Med. Phys.* 2008; 35(11): 5179-5186.
- [32]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Dosimetry of small static fields used in external beam radiotherapy. An international code of practice for reference and relative dose determination. Technical Report Series 483, Vienna: IAEA, 2017.
- [33]. International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Report No. 90: Key data for ionizing-radiation dosimetry: measurement standards and applications. *ICRU. Journal of the ICRU.* 2014; 14(1).
- [34]. BÜERMANN L, WALWYN SALAS G, ROMERO ACOSTA AL. Comparison of the national standards of air kerma between the PTB and the CPHR for selected x-radiation qualities used in radiation protection, diagnostic radiology and radiation therapy. *Metrologia.* 2020; 57(1A).
- [35]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Implementation of the international code of practice on dosimetry in diagnostic radiology (TRS 457): review of testing results. IAEA Human Health Series No.4. Vienna: IAEA, 2011.
- [36]. KESSLER C. Establishment of simulated mammography radiation qualities at the BIPM. Rapport BIPM-06/08. Pavillon de Breteuil. F-92312 SEVRES cedex. 2006.
- [37]. KESSLER C, ROGER P, BURNS D T. Establishment of reference radiation qualities for mammography. BIPM Rapport-2010/01. Pavillon de Breteuil. F-92312 SEVRES cedex. 2010.
- [38]. WALWYN SALAS G, HOURDAKIS C, MARTINEZ A, GONZALEZ N, VERGARA A. Assuring the quality of the mammography calibrations in Cuban laboratory by comparison with Greek dosimetry standard. Proceedings of an International Symposium. Standards, Applications and Quality Assurance in Medical Radiation Dosimetry (IDOS). 9-12 November 2010. Book of the extended synopses. pp. 245-246. Vienna: IAEA, 2011.
- [39]. KESSLER C, BURNS DT, BÜERMANN L. Key comparison BIPM.RI (1) -K7 of the air-kerma standards of the PTB, Germany and the BIPM in mammography x-rays. *Metrologia.* 2011; 48(1A): 06011.
- [40]. CSETEI I, BÜERMANN L, GOMOLA I, GIRZIKOWSKY R. Comparison of air kerma measurements between the PTB and the IAEA for x-radiation qualities used in general diagnostic radiology and mammography. *Metrologia.* 2013; 50(1A): 06008.
- [41]. KESSLER C, BURNS DT, CZAP L, et. al. Comparison of the air kerma standards of the IAEA and the BIPM in mammography x-rays. *Metrologia.* 2013; 50(1A): 06005.
- [42]. KESSLER C, BURNS DT, MC CAFFREY JP. Key comparison BIPM.RI(1)-K7 of the air-kerma standards of the NRC, Canada and the BIPM in mammography x-rays. *Metrologia.* 2011; 48(1A): 06022.
- [43]. KESSLER C, BURNS DT, STEURER A, et. al. Key comparison BIPM.RI(1)-K7 of the air-kerma standards of the BEV, Austria and the BIPM in mammography x-rays. *Metrologia.* 2015; 52(1A): 06003.
- [44]. WITZANI J, BJERKE H, BOCHUD F, et. al. Calibration of dosimeters used in mammography with different X ray qualities: Euromet Project No. 526. *Radiat. Prot. Dosimetry.* 2004; 108(1): 33-45.
- [45]. ANKERHOLD U, HUPE O, AMBROSI P. Deficiencies of active electronic radiation protection dosimeters in pulsed fields. *Radiat Protect Dosim.* 2009; 135(3): 149-153.
- [46]. GINZBURG D. Ionisation chamber for measurement of pulsed photon radiation fields. *Radiat Protect Dosim.* 2016; 174(3): 297-301.
- [47]. KLAMMER J, ROTH J, HUPE O. Novel reference radiation fields for pulsed photon radiation installed at PTB. *Radiat Protect Dosim.* 2012; 151(3): 478-482.
- [48]. International Atomic Energy Agency (IAEA). Technical and functional specification for border monitoring equipment, technical guidance. IAEA Nuclear Security Series No.1. Vienna: IAEA, 2006.

Recibido: 13 de septiembre de 2022

Aceptado: 22 de septiembre de 2022

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en la realización, ni la comunicación del presente trabajo.

CRedit / Conceptualización: Gonzalo Walwyn Salas, Oscar Díaz Rizo. **Fuentes:** Gonzalo Walwyn Salas, Oscar Díaz Rizo. **Curación de datos:** Gonzalo Walwyn Salas, Niurka González Rodríguez. **Análisis formal:** Gonzalo Walwyn Salas, Oscar Díaz Rizo, Niurka González Rodríguez. **Supervisión:** Gonzalo Walwyn Salas. **Adquisición de fondos:** Gonzalo Walwyn Salas. **Validación:** Gonzalo Walwyn Salas, Niurka González Rodríguez. **Investigación:** Gonzalo Walwyn Salas, Oscar Díaz Rizo, Niurka González Rodríguez. **Visualización:** Gonzalo Walwyn Salas, Oscar Díaz Rizo. **Metodología:** Gonzalo Walwyn Salas, Oscar Díaz Rizo, Niurka González Rodríguez. **Administración del proyecto:** Gonzalo Walwyn Salas. **Escritura – borrador original:** Gonzalo Walwyn Salas. **Redacción – revisión y edición:** Gonzalo Walwyn Salas, Oscar Díaz Rizo.