

Rol of radiation protection in interventional cardiology

Papel da proteção contra radiação em procedimentos de cardiologia intervencionista

Rol de la protección radiológica en procedimientos de cardiología intervencionista

Article Info:

Article history: Received 2021-07-18 / Accepted 2021-09-08/ Available online 2021-09-20

doi: 10.18540/jcecv17iss4pp13102-01-15e

Teodoro Rivera Montalvo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5524-2360>

Instituto Politécnico Nacional, México

E-mail: riveramt@hotmail.com

Eduardo Santiago Uruchurtu Chavarín

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4257-1878>

Hospital Juárez de México, México

E-mail: eduardo.uruchurtu@gmail.com

Resumen

El objetivo de la protección radiológica es permitir el aprovechamiento de la radiación en todas sus formas conocidas, con un riesgo aceptable tanto para el personal que trabaja con los rayos X como para la población en general y las generaciones futuras. Debido al potencial daño que pueden ocasionar los rayos X, no se debe permitir ninguna exposición innecesaria. El principio que gobierna la protección radiológica en todas las exposiciones se conoce con el nombre de ALARA (as low as reasonable achievable) que se traduce como: “Tan bajo como sea razonablemente posible” para nuestro caso lo manejaremos como Tan bajo como sea razonablemente práctico. El objetivo de este trabajo es poder concientizar a los médicos cardiólogos intervencionistas y a los tomadores de decisiones de la importancia de establecer un programa de capacitación y entrenamiento en protección radiológica.

Palabras-clave: Cardiología intervencionista. ACTP. Dosimetría. Protección Radiológica.

Abstract

The purpose of radiation protection is to provide an appropriate of protection to human the use of radiation in all its known forms, with an acceptable risk both for personnel working with X-rays and for the public and future generations. Due to the potential X-rays risks that can cause, no unnecessary exposure should be allowed. The ALARA (as low as reasonable achievable) principle that leads radiological protection in all exposures, for our case we will handle it as “As low as reasonably practical”. The aim of this work is to make interventional cardiologists and decision makers aware of the importance to establish a training program in radiation protection.

Keywords: Interventional Cardiology. PTCA. Dosimetry, Radiation Protection.

1. Introducción

A raíz del descubrimiento de los rayos X a finales del siglo XIX que en un principio se hizo por serendipia como la mayoría de los descubrimientos, y agracias este descubrimiento la medicina sin duda fue la más beneficiada. La cardiología intervencionista (CI) es la subespecialidad de la cardiología encargada del diagnóstico y tratamiento de cardiopatías que utiliza sistemas de imágenes dinámicas para conducir procedimientos clínicos con fines diagnósticos y terapéuticos. Los procedimientos de Intervencionismo que utiliza fluoroscopia presenta tremendas ventajas

comparada con los procedimientos quirúrgicos invasivos, debido a que solamente requiere una pequeña incisión que substancialmente reduce los riesgos de infección y permite poco tiempo de estadio de post-tratamiento (Rivera and Uruchurtu 2020). En la actualidad los procedimientos en CI se hacen cada vez más complejos, la complejidad de las patologías requiere decisiones cada vez más complejas, se requieren tratamientos terapéuticos multidisciplinarios y también se requiere utilizar un tiempo prolongado de los rayos X. A pesar de sus múltiples beneficios, procedimientos como la angiografía coronaria y la angioplastia coronaria transluminal percutánea (ACTP), involucran tiempos elevados de fluoroscopia y mayor número de imágenes de cineradiografía, que exponen a los pacientes y al equipo médico a altos niveles de radiación (Malchair et al. 2020). Hay muchas organizaciones internacionales y grupos especializados en protección radiológica han puesto su interés en optimizar el uso de los rayos X en CI para el personal ocupacionalmente expuesto (POE) y para el paciente (IAEA 2012, ICRP 2014, ICRP 2013). El objetivo de este trabajo es poder concientizar a los médicos cardiólogos intervencionistas y a los tomadores de decisiones de la importancia de establecer un programa de capacitación específica y entrenamiento en protección radiológica en todas las salas de cardiología intervencionista en el país, ya que aún existe una exposición alta debido al uso prolongado de los rayos X.

2. Antecedentes históricos

La cardiología intervencionista (CI) es una subespecialidad relativamente nueva, sí bien comienza en el siglo XIX, que comprende procedimientos tanto con fines diagnósticos como terapéuticos aplicados a la patología cardiovascular, la mayor parte de su historia se desarrolla en estos últimos años con la angiografía coronaria (AC) y con la angioplastia coronaria transluminal percutánea (ACTP), constituyéndose en una subespecialidad en constante crecimiento.

La CI y la protección radiológica (PR) inician su historia el 8 de noviembre de 1995, cuando el físico alemán Wilhelm Conrad Röntgen, quien sugirió la utilización de los rayos X en la medicina: como objeto de demostración del poder de penetración de los rayos X, había escogido entre otros la mano de su esposa, de la cual realizó la primera radiografía el 22 de diciembre de 1895.

El primer cateterismo realizado utilizando rayos X como imagen guiada es documentado por el Dr. Werner Forssman en 1929 tras experimentar cateterismo cardíaco en cadáveres humanos (Forssman 1974). En 1930, los Drs. Jiménez Díaz y Sánchez Cuenca confirmaron, radiológicamente el uso de los rayos X (Pérgola 1987). En 1959, el Dr. M. Sones en la Cleveland Clinic desarrolló un procedimiento de coronariografía selectiva con amplificación apropiada de imágenes y amplificación óptica con técnica de cine de alta velocidad (Sones et al. 1968). En 1964, el radiólogo estadounidense de origen alemán Charles Dotter y Melvin Judkins, en la Universidad de Oregón, realizaron la primera angioplastia en las arterias de las piernas, acuñándose, la palabra “angioplastia”. En 1968 el Dr. René Favoloro, difundió la práctica de la coronariografía de forma masiva tras realizar la primera cirugía de revascularización miocárdica (Favoloro 1968). En el año 1982 el Dr. Kan, publicó la técnica de valvuloplastia pulmonar con balón, vigente actualmente (Kan 1982). Existen, también, referencias de que en el año 1977, el Dr. Andreas Roland Gruentzig realizó exitosamente la primera angioplastia coronaria transluminal percutánea en un paciente despierto en el hospital universitario de Zurich en Suiza. Es considerado el padre de la angioplastia coronaria, murió en Estados Unidos en 1985 (Gruentzig et al. 1979).

La primera valvuloplastia pulmonar llevada a cabo en el mundo fue efectuada en el Instituto Nacional de Cardiología en el año 1953, tratamiento de la estenosis pulmonar valvular; el primer cateterismo retrógrado de las cámaras izquierdas del corazón con registro simultáneo del electrocardiograma intracavitario (Limon-Lason et al. 1950); Las primeras angioplastias coronarias las hizo el doctor Farel en el Centro Médico Nacional Siglo XXI, posteriormente en el hospital español.

A pesar de los grandes beneficios de los procedimientos de cardiología intervencionista, hay un riesgo asociado que exponen a los pacientes y al personal médico a altos niveles de radiación², el uso del haz de rayos X en CI se puede utilizar la expresión “espada de doble filo” por un lado el

beneficio es inminente pero el uso prolongado puede producir serias lesiones al paciente. Diversos estudios han reportado daños ocupacionales atribuidos a la radiación en CI (UNSCEAR 2017). Un informe de 2009 del comité nacional de protección contra las radiaciones y medidas (NCRP 2010) encontró que la contribución sobre la dosis recibida a partir de procedimientos cardiológicos y radiológicos en el mundo es de 0.43 mSv anuales lo que equivale a 22 radiografías de tórax por persona y por año.

3. Exposición y riesgo a los rayos X en Cardiología Intervencionista

Los efectos biológicos debidos a la exposición a los rayos-X empiezan con la transferencia de energía a nivel molecular y culminan con el daño al individuo, este daño es proporcional a la cantidad de energía absorbida y la radiosensibilidad de las células que la absorben. La transferencia de energía en el tejido humano se llevan a cabo en varias etapas: **Etapa física**, es una respuesta inmediata que ocurre entre billonésimas y millonésimas de segundo. En esta etapa se produce la interacción de los electrones orbitales con los fotones que constituyen el haz de radiación. **Etapa química**, esta etapa es de un orden ligeramente mayor estando en una escala de entre una millonésima de segundo y un segundo. Es el proceso de la interacción de los radicales libres resultantes de la radiólisis del agua. **Etapa biológica**, la etapa biológica se inicia con la activación de reacciones enzimáticas para reparar el daño producido por las radiaciones. Algunas de estas lesiones serán reparadas y no influyen en la viabilidad celular y otras no serán reparadas con lo que se producirá la muerte celular en interface, mitosis o incluso después de varias divisiones celulares tras la exposición a la radiación y la **etapa de protección radiológica**, que se clasifica en efectos **somáticos y genéticos**, los primeros son aquellos que se manifiestan en el individuo irradiado es decir los efectos son inducidos sobre las células de la línea somática o germinal. Los efectos somáticos se dividen a su vez en inmediatos y tardíos, en función del tiempo transcurrido desde su irradiación. A su vez y en función de la incidencia que tiene la radiación sobre los efectos, éstos se clasifican en aleatorios o **estocásticos** y en **reacciones tisulares o determinísticos**.

Los efectos **estocásticos**, son aquellos que se caracterizan por el hecho de que la probabilidad de que ocurra el efecto depende de la dosis de radiación. Los efectos estocásticos, incluido el cáncer, tienen un período de latencia prolongado y el riesgo atribuible a lo largo de la vida es difícil de cuantificar. Debido a la radiosensibilidad de los tejidos, los niños tienen el mayor riesgo, seguidos por las mujeres adultas, los hombres adultos y luego los ancianos (Brambila et al. 2020). Los riesgos estocásticos en cardiología intervencionista son más probables por las dosis altas de radiación, pueden aparecer a dosis superiores a 100mSv (Seibol et al. 2020).

Las **reacciones tisulares** (también llamados **efectos determinísticos**) son aquellas que aparecen como consecuencia de elevadas exposiciones a la radiación, que resultan en daños a un número importante de células y en los que existe una dosis umbral por debajo de la cual no se producirán dichos efectos. Existen tres tipos de respuesta de las células a una exposición a radiaciones ionizantes: retraso en la división durante determinado periodo de tiempo, fallo reproductivo y muerte celular. Los riesgos deterministas de la radiación están bien descritos. Existen umbrales de exposición conocidos para la lesión tisular que son relevantes para los pacientes, como el eritema temprano cutáneo es de 2 Gy y la lesión cutánea permanente (≈ 5 Gy). Para los operadores, el cristalino el riesgo de cataratas aumenta con una exposición aguda tan baja como 0.1 Gy y una exposición crónica de 5 Gy (Jaschke et al. 2017).

La respuesta de un organismo adulto a una exposición de rayos X puede presentar síntomas según la dosis y el tiempo de exposición, cuando el resultado de las lesiones celulares se producen en un solo periodo y a una dosis aguda de radiación (en un tiempo muy corto, del orden de minutos) de todo el organismo produce signos, síntomas y un cuadro clínico variables que se conoce con el nombre de síndrome agudo de radiación (SAR). Los síntomas del SAR incluyen dolor de cabeza y diarrea. Por lo general, comienzan dentro de unas horas. Esos síntomas desaparecerán y la persona parecerá saludable por un tiempo. En algunos casos, este síndrome causa la muerte en los siguientes días o semanas

Lo preocupante es que los cardiólogos intervencionistas se encuentran entre los profesionales de la salud con mayor exposición a la radiación. Según la publicación 103 de la ICRP de los especialistas que trabajan con radiación ionizante, los cardiólogos intervencionistas son lo que tienen mayor exposición anual a la radiación (figura 1). Un cardiólogo intervencionista tiene una exposición anual a radiación que oscila entre 2-6 mSv/año (equivalente a 150 radiografías de tórax año); en 30 años de trabajo la dosis de radiación aproximada equivale a 100 mSv.

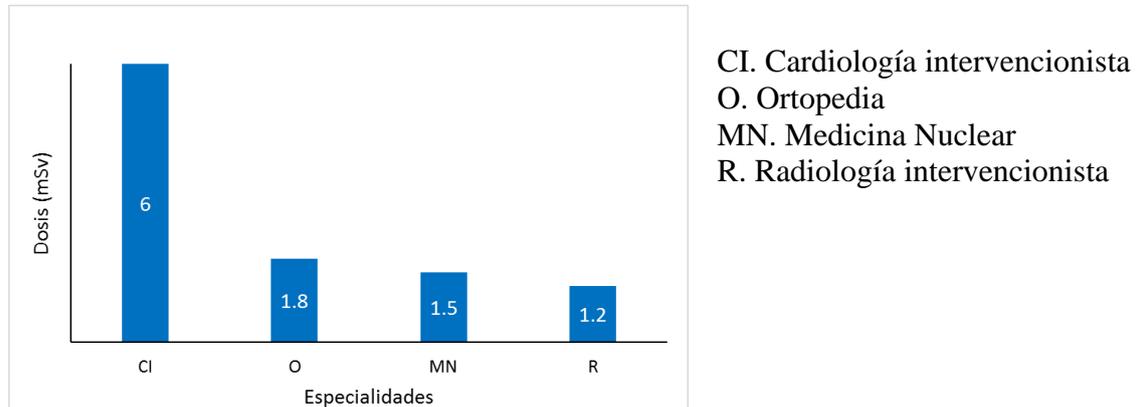


Figura 1. Exposición anual en dosis efectiva a radiación para las diferentes especialidades médicas.

Los daños biológicos se deben a los cambios que los rayos X producen en los tejidos. Estos cambios son proporcionales a la energía absorbida por unidad de masa, y por lo tanto la magnitud básica en protección radiológica es la **dosis absorbida**, es la energía impartida a una proporción de masa. Rigurosamente hablando, lo que reportan los equipos de dosimetría no es la energía de la radiación absorbida por el aire, sino la energía transferida por la radiación a las partículas cargadas resultantes de la ionización. Por estas razones, el Código de práctica del OIEA y el informe 74 de la ICRU recomiendan utilizar el **kerma en aire** en lugar de la dosis absorbida, el resultado no es realmente la dosis absorbida sino la magnitud denominada **kerma**, que rinde cuenta de la energía cinética inicial que llevan los electrones resultantes en el proceso de ionización. En el caso de los rayos X cuando el kerma en aire se convierte en dosis a los tejidos, los valores de dosis absorbida en dichos tejidos y de kerma en los mismos son numéricamente iguales. Además de la energía depositada por unidad de masa lo más importante es el daño biológico que causa la energía impartida en órganos y tejidos, esta magnitud se llama **dosis equivalente**. El daño biológico es distinto para distintos tejidos, aunque reciban la misma dosis absorbida e incluso la misma dosis equivalente. Esto se debe a que la radiosensibilidad de los mismos es diferente, siendo en general mayor en aquellos con una actividad mitótica mayor.

Para rendir cuenta de la mayor o menor radiosensibilidad es necesario incorporar otros factores adicionales de ponderación asociados a los tejidos u órganos. La finalidad de estos factores es la de ponderar el valor de dosis, corrigiéndole según la sensibilidad de los distintos órganos y tejidos, de manera que al sumar estos valores se obtenga una magnitud que refleje el daño global, esta magnitud se llama **dosis efectiva**. La dosis efectiva, es una dosis representativa para todo el cuerpo independiente del lugar donde se administra la radiación y permite comparaciones entre individuos expuestos. La dosis efectiva se puede estimar de forma aproximada multiplicando el producto del área de dosis por 0.26 (IAEA-SAFRAD 2020, ICRP 2017). Como referencia, la exposición de radiación de fondo natural a un individuo es de 1.9 mSv/año en la ciudad de México determinado en 2020.

Para evaluar la dosis de radiación impartida o suministrada a un paciente se utilizan magnitudes de incidencia: **Kerma incidente**, es el kerma en aire de un haz incidente de rayos X medido en el eje central del rayo de la superficie del paciente o maniquí. Para evaluar el riesgo de la cantidad de rayos X reciba por el paciente durante un procedimiento se utiliza el **producto de**

dosis por área o Kerma por área (PDA o PKA). Es el producto de la dosis absorbida en aire, promediada respecto a la sección del haz (**D**) y multiplicada por el área de dicha sección (**A**). Esta magnitud es utilizada para valores de referencia para pacientes. El PDA sirve para obtener la dosis de entrada de una forma sencilla y ayuda a obtener la energía impartida al paciente.

Kerma en aire en superficie de entrada (KASE). Es el Kerma en aire que se mide en el eje central del haz sobre la superficie de entrada del paciente. En el K_i se toma en cuenta la radiación incidente sobre el paciente y también la radiación dispersada por el mismo. $KASE = k_i * B$; donde, **B** es el factor de retrodispersión (cociente entre dosis en la superficie de entrada de un material y la dosis en condiciones iguales en ausencia de material dispersor). El factor **B** depende de la calidad del haz y del tamaño del campo.

La dosis en la superficie de entrada (DSE). Es la dosis en el punto de intersección del eje del haz con la superficie del paciente. Se debe adaptar el valor a las diferentes distancias según las proyecciones de los estudios de radiodiagnóstico el factor de retrodispersión depende de varios factores, tales como tamaño de campo, densidad del medio, corriente.

Tanto la comisión internacional de unidades y medidas (ICRU) (ICRU 1993) como la ICRP (ICRP 2001) han contribuido a definir las magnitudes y unidades que se emplean en la protección radiológica en radiología intervencionista. En la tabla 1 se representan en resumen estas magnitudes con sus correspondientes unidades.

Tabla 1. Magnitudes y unidades radiológicas utilizadas en cardiología intervencionista

Magnitud	Definición	Unidad	Equivalencia
Para el POE			
Kerma incidente en aire (K_i)	Representa la energía cinética dada a los electrones liberados por los rayos-x por unidad de masa en el aire	Gray (Gy)	1 Julio/kg
Dosis absorbida incidente (D_i)	La dosis absorbida incidente significa la medición de la dosis absorbida de la radiación incidente en el paciente, al centro del haz de rayos-x	Gray (Gy)	1 Julio/kg
Dosis equivalente en un órgano (H)	Dosis de radiación absorbida en un órgano o tejido, ponderada según el tipo de radiación	Sievert (Sv)	1 Julio/kg
Dosis efectiva (D_E)	Suma de las dosis equivalentes recibidas por todos los órganos y tejidos de una persona	Sievert (Sv)	1 Julio/kg
Para el paciente			
Kerma en aire en la superficie de entrada (KASE)	Es el Kerma medido en aire libre con retrodispersión en la intersección del eje del haz de radiación con el plano correspondiente a la superficie de entrada del cuerpo. $KASE = K_i * B$	Gray (Gy)	1 Julio/kg
Producto kerma en aire por área (PDA ó PKA)	Producto de la dosis promediada en la sección del haz (D) y multiplicada por el área (A) $PDA = D * A$	Gy/cm ²	J/kg.m ²
Dosis en la superficie de entrada (DSE)	Es la dosis en el punto de intersección del eje del haz con la superficie del paciente	Gray (Gy)	1 Julio/kg
Dosis media en el tejido u órgano (D)	Es la energía deposita por unidad de masa del órgano del paciente	Gray (Gy)	1 Julio/kg
Dosis máxima cutánea (D_{maxC})	Dosis incidente absorbida acumulada en el área más irradiada en la piel	Gray (Gy)	1 Julio/Kg

Para estimar las dosis impartidas en los pacientes durante los procedimientos intervencionistas se suele utilizar la magnitud producto kerma-área ($\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$), que corresponde al producto del kerma en aire a la entrada de la superficie de la piel multiplicado por la superficie irradiada en cm^2 . La ICRP recomienda que se tenga en cuenta la complejidad de los procedimientos intervencionistas cuando se establecen los valores de referencia (ICRP 2013). Los valores orientativos propuestos por el OIEA (IAEA 2009) se encuentran enumerados en la Tabla 2.

Tabla 2. Niveles de referencia para procedimientos diagnósticos y terapéuticos en cardiología intervencionista

Procedimiento	Dosis efectiva media (mSv)	PDA (Gy/cm^2)	Numero equivalente de placas radiográficas de tórax (0.02 mSv)
Angiografía coronaria (AC)	3.1	26	155
Implantación de marcapasos	4	17	200
ACTP, colocación stent	15.1	58	755

3.1 Riesgo de cataratas radioinducidas en cardiólogos intervencionistas

En los últimos años, la ICRP ha decidido disminuir el límite de dosis ocupacional a 20 mSv al año. E OIEA ha realizado varios estudios de evaluación de opacidades radioinducidas en cardiólogos, en Latinoamérica, Asia y Europa, indicando opacidades en cardiólogos intervencionistas que podían haber sido causadas por las radiaciones ionizantes después de varios años de trabajo sin las medidas adecuadas de protección radiológica. En las estimaciones de dosis se llegó a encontrar profesionales que podrían haber recibido dosis > 1 Gy en el cristalino a lo largo de varios años de trabajo sin la protección adecuada (Haga et al 2017, Vano et al. 2013). Por consiguiente, la implementación de programas de protección radiológica es fundamental para limitar el riesgo de efectos estocásticos a largo plazo.

3.2 Lesiones radioinducidas en la piel

Los efectos de las radiaciones sobre la piel dependen de la dosis, de la profundidad y área de la piel irradiada. El nivel de severidad de los síntomas es igual que para las quemaduras comunes: eritema, edema, ampollas, úlceras, necrosis y esclerosis. Por lo tanto es de esperar que los pacientes en angioplastia coronaria sean los primeros en sufrir los efectos adversos. Los ejemplos más comunes de reacciones tisulares de interés en cardiología intervencionista son las lesiones cutáneas radioinducidas en los pacientes, que se han observado como resultado de estudios en procedimientos de intervenciones coronarias percutáneas que han recibido dosis acumulada estimada en el rango de 0.7 a 7.12 Gy (Jaschke et al. 2017, Malchair et al. 2020).

3.3 ¿Se pueden evitar las reacciones tisulares? y ¿el rol de la protección radiológica?

Estas preguntas reflejan la esencia del problema de nuestro artículo. Los efectos determinísticos tales como esterilidad, catarata, eritema, trastornos hematopoyéticos y el síndrome agudo por radiación, pueden evitarse si las dosis que reciben las personas no sobrepasan determinados umbrales; estos son de alrededor de 0.5 gray (Gy) en el caso de la exposición aguda y de 0.1 Gy en el de la exposición crónica. Los riesgos asociados con la exposición a las radiaciones dependen de las dosis de radiación que reciben las personas expuestas. Para lograr este objetivo es necesario recurrir a la filosofía de la protección radiológica.

El objetivo de la protección radiológica es permitir el aprovechamiento de la radiación, en todas sus formas conocidas, con un riesgo aceptable tanto para los médicos especialistas como para

el paciente. Para el paciente prevenir la ocurrencia de las reacciones tisulares y para el POE prevenir los efectos determinísticos y reducir la probabilidad de ocurrencia de los efectos estocásticos. Estos objetivos se concretan en tres principios:

Justificación de que las exposiciones produzcan un beneficio neto frente a los riesgos que conllevan.

Limitación de dosis, de manera que las exposiciones a los profesionales y al público no sobrepasen los valores establecidos, por encima de los cuales se encuentran los umbrales de dosis para radiolesiones locales o el riesgo de inducción cáncer llegaría a ser inaceptable.

Optimización de la protección de manera que las dosis se mantengan tan bajas como sea razonablemente posible haciendo que el beneficio neto sea el mayor posible.

El principio que gobierna la protección radiológica en caso de exposición se conoce con el nombre de ALARA (as low as reasonably achievable) que se traduce como: tan bajo como razonablemente sea posible, cuando se trate de procedimientos intervencionistas terapéuticos se trata de trabajar junto del paciente y se requieren conocimientos sobre los riesgos y mayor destreza del médico cardiólogo intervencionista por eso decimos que sería conveniente utilizar el término tan bajo como razonablemente sea práctico.

Los efectos atribuidos a los rayos X a bajas dosis denominados estocásticos no pueden evitarse por completo. Desde la creación del comité Internacional de Protección para los Rayos X en 1928, se ha tomado la limitación de dosis como bastión para la protección de las personas contra los peligros de las radiaciones, que posteriormente la ICRP (ICRP 1991) ha abanderado, el valor umbral de la limitación de dosis que ha evolucionado a través del tiempo como se muestra en la figura 2, como el significado de las magnitudes y unidades de medida adoptadas para correlacionar la exposición a las radiaciones con sus riesgos y los criterios adoptados a lo largo del tiempo en torno a la protección de las personas (IAEA 2012).

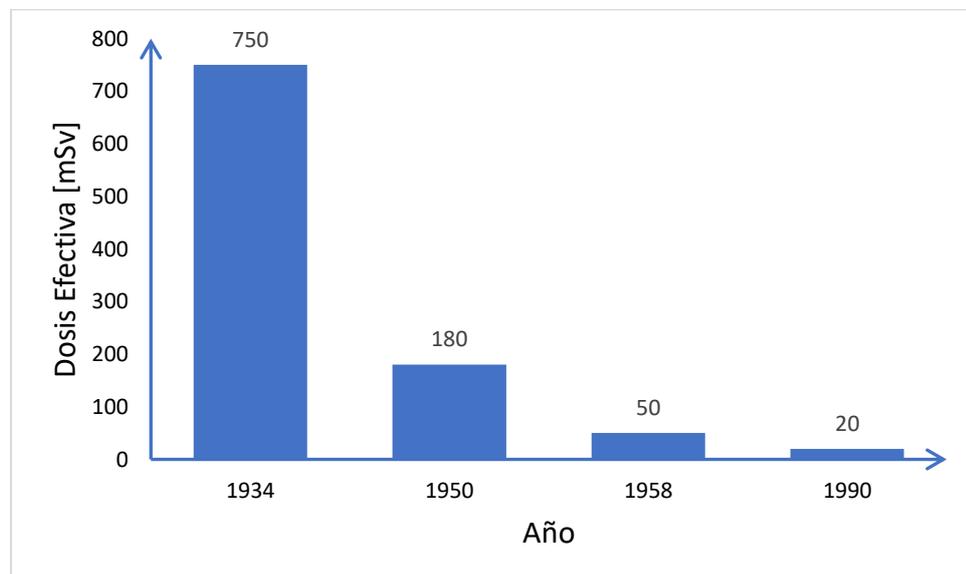


Figura 2. Evolución de los límites de dosis recomendados por la CIPR para los trabajadores

4. Protección radiológica ocupacional

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), junto con la Organización Panamericana de la Salud (OPS), la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Internacional del Trabajo (OIT) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), así como la Agencia Nuclear de Energía (NEA) de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), han elaborado varios documentos orientados a apoyar el establecimiento de organizaciones reguladoras nacionales. El primero de ellos, las Normas básicas internacionales para la protección contra las radiaciones ionizantes y la seguridad de fuentes

de radiación, constituye una guía práctica para la estructuración de las normas de protección radiológica y las funciones reguladoras en los países.

El OIEA brinda asistencia a los Estados Miembros que la requieran para la creación y el desarrollo de organizaciones reguladoras de la protección radiológica en medicina. La exposición del médico cardiólogo encargado considerado como operador uno, el auxiliar que también es un médico cardiólogo junto con el técnico radiólogo son los que reciben mayor dosis de radiación dispersada proveniente del paciente. La distribución de esta radiación alrededor del operador principal no es uniforme debido a factores como la masa corporal del paciente, el estado y la operación del equipo de fluoroscopia, así como del uso de los dispositivos de protección radiológica, (delantales plomados y protectores de tiroides). Además, no existe un método estandarizado de dosimetría personal en cardiología intervencionista que permita hacer una comparación adecuada de los resultados dosimétricos entre estudios.

La protección del personal en una sala de CI contra los riesgos originados por los rayos X en el medio ambiente laboral se ha basado en los principios de la protección radiológica. Si bien en sus inicios la protección contra las radiaciones ionizantes se rigió por el establecimiento de límites a la exposición individual, a partir de la década de 1970 el concepto de límite comenzó a concebirse como una referencia de riesgo máximo, tolerable solo en situaciones excepcionales. La filosofía de la protección radiológica se desplazó entonces gradualmente hacia la justificación.

En la tabla 3 se resumen los valores de los límites anuales de dosis recomendados por la ICRP en 2017 (ICRP 2017). El límite de dosis efectiva ocupacional para los trabajadores de radiación es de 20 mSv por año en promedio durante 5 años, y el límite de dosis para el ojo se ha reducido recientemente de 150 a 20 mSv por año para proteger aún más contra el número creciente de cataratas radioinducidas en cardiólogos intervencionistas. Estos límites no establecen una frontera entre el riesgo y la seguridad, sino que indican los valores de riesgo máximos tolerables recomendados por la ICRP. En la misma tabla se indican los valores de la probabilidad de morir de un cáncer inducido por la radiación, correspondientes a los límites de dosis, según los coeficientes de riesgo indicados por esa entidad (ICRP 1991). Muchos países han adoptado estos valores límite y se espera que se ratifiquen en la próxima edición de las recomendaciones de la ICRP. Evidencia reciente sugiere que incluso la exposición prolongada a dosis bajas de radiación podría estar asociada con leucemia, aterosclerosis de la arteria carótida y envejecimiento vascular temprano.

Tabla 3. Límites anuales de dosis efectiva recomendados por la CIPR y riesgos asociados

Grupo poblacional	Límite de dosis efectiva	Riesgo anual de morir ^b
Trabajadores	20 mSv ^a	8 por cada 10 000 trabajadores
Poblacion en general	1 mSv	5 por cada 100 000 personas

^aPromedio de las dosis efectivas recibidas en 5 años

^bRiesgo anual de morir de un cáncer inducido por radiaciones si se recibe una dosis anual de radiación igual al límite de dosis efectiva

5. Protección radiológica del paciente

Los pacientes sometidos a procedimientos diagnósticos y/o terapéuticos tienen derecho de conocer que son los rayos X, sus propiedades, cuáles son los beneficios y riesgos de su uso en los procedimientos, a pesar de que los beneficios son por demás invaluable e irremplazables para los procedimientos. Para obtener una imagen dinámica de un procedimiento radiológico en cardiología intervencionista es inevitable que el paciente reciba cierta dosis de radiación. Los procedimientos en ocasiones son complejos porque en la actualidad las patologías se hacen más complejas, esto hace que en ocasiones la exposición a los rayos X sea prolongado, se exponen tejidos que están fuera del campo de interés, lo que genera una dosis innecesaria. Debe señalarse que para los pacientes no se pueden establecer límites de dosis, porque el beneficio es inminente para el paciente. Los conceptos de justificación y optimización adquieren entonces mayor relevancia.

La ICRP (ICRP 2017) recomienda que se apliquen “niveles de referencia” (NDR) que son valores indicativos para implementar las buenas practicas. Los valores medios a un grupo de

pacientes no deberían superar los NDR en condiciones normales de trabajo. Diferentes estudios realizados en la Unión Europea han concluido la conveniencia de recomendar los siguientes niveles de referencia aproximados, asociados con el número de radiografías de tórax (Tabla 4) y el valor de radiación ambiental natural que recibe un individuo en el periodo de un año

Tabla 4. Dosis efectiva de procedimientos comunes en cardiología

Procedimiento	Dosis efectiva [mSv]	Numero de radiografías de torax (0.02 mSv)	Radiación ambiental natural (años)
Radiografía de torax	0.02	1	0.008
Angiografía coronaria	7(2-16)	350(100-800)	2.9
Angioplastía coronaria (ACTP)	15 (7-57)	750(350-2800)	6.3

En un principio, los organismos reguladores se limitaron a la vigilancia radiológica del POE para no invadir el campo médico y existía un vacío en la protección radiológica del paciente. En marzo de 2001 se celebró en Málaga, España, la Conferencia Internacional sobre Protección Radiológica del Paciente, patrocinada por varias organizaciones internacionales (OIEA, OMS, OPS, entre otras). Como resultado de esa conferencia se aprobó un plan de acción internacional para la protección radiológica de los pacientes (IAEA 2012) que contempla, entre otras, las acciones siguientes:

Promover la educación y el entrenamiento de médicos clínicos, especialistas, técnicos, enfermeras, físicos médicos, radiofarmaceutas, diseñadores de equipos, ingenieros de mantenimiento, administradores, entre otros, en protección radiológica, control de la calidad y la reducción de las dosis innecesarias y de los riesgos de exposición accidental en las aplicaciones médicas:

- Promover el intercambio de información sobre esos temas entre instituciones de diversos países
- Promover el reconocimiento de la importancia de los tecnólogos en la protección radiológica de los pacientes y mejorar su capacitación
- Promover el reconocimiento de la importancia del Físico Médico como profesional de la salud
- Preparar guías apropiadas destinadas al personal de los servicios médicos que emplean fuentes de radiación
- Reconocer que existen aspectos relacionados con la transferencia de equipos de segunda mano a países en desarrollo que inciden en la protección radiológica y proporcionar guías destinadas a los donantes de equipos de segunda mano, los receptores y las organizaciones intermediarias. En particular se debe tomar en cuenta la necesidad real del país receptor, la provisión de herramientas, accesorios; piezas de recambio y manuales; la formalización de acuerdos para las pruebas de aceptación, instalación y mantenimiento, y el entrenamiento en el uso de equipos con sus dispositivos específicos de protección.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la secretaría del Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), han preparado un informe sobre el análisis y la difusión de datos sobre la exposición a las radiaciones, en particular las exposiciones médicas. El comité ha puesto en funcionamiento una plataforma en línea para la recopilación de datos sobre la exposición médica y había invitado a todos los estados miembros a que participen en el estudio sobre el uso de radiaciones y la exposición a radiaciones en el ámbito médico. Por ello es deseable que las autoridades de salud se interesen especialmente en la protección radiológica del paciente y establezcan una acción coordinada con los organismos reguladores

6. Reducción de la dosis: objetivo de la protección radiológica

Los médicos deben mantener la dosis tan baja como sea razonablemente posible (IAEA-SAFRAD 2020), independientemente de los límites de dosis ocupacionales, además el POE debe utilizar adecuadamente los dispositivos atenuadores de radiación como los mandiles de plomo, antimonio o de bismuto para disminuir la cantidad de exposición a la radiación, esto incluye collarín, anteojos, guantes y protectores móviles, con un uso apropiado, estos reducirán la exposición a la radiación. La implementación de la retroalimentación de la dosis de radiación también puede contribuir a reducir la exposición. En este artículo, revisamos las herramientas disponibles para reducir la dosis de exposición a la radiación para el operador y para el paciente durante los procedimientos intervencionistas diagnósticos y terapéuticos, que dividimos en dos parámetros:

6.1 Parámetros técnicos para reducir la dosis de radiación

Se ha demostrado que los procedimientos de intervención cardíaca modernos, como la angiografía coronaria y la intervención coronaria percutánea (PCI), que utilizan equipos modernos reducen una exposición considerable a la radiación. Para realizar los procedimientos en cardiología intervencionista se necesita un angiógrafo especialmente diseñado y configurado para dicha práctica médica. La configuración de la sala y el equipo de rayos X debe instalarse en una sala que permita el libre movimiento del arco en C, la circulación del personal y la instalación de todos los dispositivos necesarios para la práctica intervencionista, como monitores, pantalla de techo, desfibrilador, bombas, inyectores, dispositivos de anestesia y monitores fisiológicos, la posición del operador, factores específicos del procedimiento (angulaciones del tubo, colimación, IMC del paciente). La sala debe permitir los procedimientos de atención al paciente y minimizar los riesgos para el paciente y el equipo clínico.

El OIEA recomienda incluir en la legislación de la protección radiológica, la implementación de la calidad, que consiste en programas de control y garantía de calidad, con pruebas de aceptación y comisionamiento o caracterización de los sistemas que producen rayos X para procedimientos de intervencionismo. Las normas básicas de seguridad (IAEA 2014) publicadas en 1914 establecen requisitos para la producción y manejo de los rayos X en intervencionismo. Aunque en México todavía no existe una regulación específica para el uso de rayos X en cardiología intervencionista, una norma reguladora de la secretaria del trabajo y previsión social (NOM-012-STPS-2012) establece las pautas básicas para proteger la salud de los trabajadores de la salud. La COFEPRIS establece las condiciones, los requisitos de funcionamiento y los accesorios de protección radiológica que debe tener el equipo de fluoroscopia (NOM-229-SSA1-2002). Para ello, es deseable contemplar los siguientes puntos para reducir la exposición:

6.1.1 Ajuste de la configuración de rayos X y la frecuencia de fluoroscopia. En muchos sistemas de cateterismo, la configuración predeterminada para la adquisición es de 15 cuadros por segundo (FPS) sin embargo es recomendable que los procedimientos se realicen a 7.5 FPS. Al disminuir la frecuencia de imagen de la fluoroscopia, la exposición a la radiación se reduce en un 30% y el PDA en un 19%. Se recomienda trabajar en conjunto el cardiólogo y el físico médico para tratar de trabajar con 3.5 FPS. En este sentido se recomienda utilizar el menor cuadro por segundo.

6.1.2 Colimación y magnificación. Reducir el tamaño de campo y aumentar el tamaño de magnificación reduce la cantidad de exposición a la radiación. Hay una reducción cuasi-lineal en la dosis de radiación con una reducción en el área de la superficie irradiada. Los equipos nuevos cuentan con sistemas de retención de la última imagen y la colimación virtual. La adquisición en modo **cine**, la exposición a la radiación es cinco veces mayor que en modo fluoroscopia. Para almacenar las imágenes se recomienda hacerlo utilizando el sistema de retención de la última imagen en lugar de grabar en modo cine.

6.1.3 Dispositivos de protección radiológica. El uso de dispositivos de protección radiológica en salas de intervencionismo cardiaco es fundamental

6.1.4 Gorras de plomo. Se ha sugerido que el uso de las gorras de plomo reduce la dosis en la cabeza en comparación con las pantallas de plomo montadas en el techo. Sin embargo, el peso de las gorras de plomo provoca dolor de cuello y espalda. Actualmente se disponen gorras de compuesto de óxido de bismuto con un peso de 125g y reducen la dosis de radiación hasta en un 90%.

6.1.5 Guantes de plomo. Las manos son las extremidades de los cardiólogos que están más expuestas a rayos X porque no están protegidas y están cerca del haz. Sin embargo, los guantes de plomo reducen la destreza de las manos de los operadores. La mejor manera de proteger las manos es retirarlas del haz primario.

6.1.6 Gafas con recubrimiento de plomo. El primer operador en cardiología intervencionista es el que tiene un alto riesgo de cataratas radioinducidas. Los estudios han demostrado que el uso de anteojos emplomados reduce la dosis de radiación al cristalino en un 98%. Para reducir el alto riesgo se recomienda siempre trabajar con tubo de rayos por debajo de la mesa o a 30° PA.

6.1.7 Mandil emplomado. Los mandiles emplomados son eficaces para reducir la exposición para el primer operador que se debe adaptar su uso como rutinaria en todas las salas de hemodinamia. Se recomienda un mandil de dos piezas para mayor eficacia. El peso del mandil puede causar problemas de espalda, por ello, los más nuevos están hechos de compuestos o aleaciones de plomo y son 20-40% más livianos (4 kg). Los mandiles hechos a base de óxido de bismuto son más ligeros, pero son un poco menos efectivos que los mandiles de plomo. El ajuste del mandil es importante, ya que los espacios grandes pueden aumentar la exposición a la radiación del tejido mamario en las mujeres. La calidad de los mandiles debe comprobarse anualmente para asegurarse de que no haya grietas en la capa radioprotectora. Los mandiles deben manipularse con cuidado y almacenarse en estantes especialmente diseñados para mantener la integridad de la capa radioprotectora, no deben doblarse ni arrugarse durante el almacenamiento.

6.1.8 Collarín para tiroides. La tiroides es un órgano radiosensible y se ha relacionado con un mayor riesgo de carcinogénesis con la exposición a los rayos X, sino está protegida recibe una cantidad significativa de radiación dispersa. Se debe usar collarín para tiroides durante los procedimientos y no debe haber un espacio entre el protector de tiroides y el mandil de plomo.

6.1.9 Protector suspendido. Los protectores suspendidos en el techo reducen la dosis de radiación dispersa en cabeza y el cuello del primer operador. El protector debe estar lo más cerca posible del paciente para reducir la dispersión en la fuente.

6.1.10 Faldón de plomo. En la parte inferior de la mesa, en la región inferior del operador debe existir un protector emplomado para proteger las extremidades inferiores del operador, este protector reduce hasta un 90% la dosis de radiación dispersa.

6.1.11 Sistema de protección radiológica de gravedad cero. El sistema de pórtico suspendido en el techo es capaz de soportar un traje con forro de plomo que elimina el peso de los delantales de plomo. Estos delantales de plomo tienen una equivalencia de plomo de 1 mm desde la tiroides hasta la ingle, que es aproximadamente el doble de protección en comparación con los delantales de plomo estándar. En combinación con el blindaje del lado de la mesa, una pantalla de plomo suspendida en el techo reduce la dosis al primer operador hasta un 90%

6.1.12 Calidad de imagen. La calidad de la imagen y la dosis están estrechamente relacionadas. La reducción de la dosis provoca una disminución en la calidad de la imagen, por lo que es necesario trabajar en conjunto físico médico y cardiólogo para generar y procesar imágenes en DICOM para mejorar la calidad de las imágenes clínicamente aceptables obtenidas con tasas de dosis tan bajas como sea razonablemente posible.

6.1.13 Inteligencia artificial. Aunque el formato de Imágenes y Comunicaciones Digitales en Medicina (DICOM) representa un avance significativo en el procesado (adquisición, manejo y manipulación) de imágenes dinámicas en cardiología intervencionista, la inteligencia artificial (IA) viene a revolucionar tanto en el tratamiento de las imágenes como en la toma de decisiones de la sala. La IA resulta ser una herramienta de apoyo en la toma de decisiones, en la optimización de la dosis y además en la detección de anomalías durante el procedimiento.

6.1.14 Dosimetría en cardiología intervencionista. El servicio de cardiología intervencionista debe registrar la distribución de la dosis de radiación procedente del arco en C, para implementar un sistema de seguimiento de la dosimetría en tiempo real monitoreando kerma en aire (Ka) y PKA. También se recomienda usar dosímetros de estado sólido para realizar un mapeo dosimétrico en la región del haz incidente para determinar la dosis máxima de entrada en superficie, este monitoreo permite evaluar el riesgo de radiación del paciente durante el procedimiento. Para el POE los dosímetros personales son el estándar de oro para medir la dosis de radiación para el operador. La publicación ICRP 135 (ICRP 2017) recomienda el uso de tres dosímetros para el POE; colocar un dosímetro debajo del mandil de plomo a la altura del pecho; un segundo dosímetro debe ubicarse por encima del mandil emplomado al nivel del cuello; y un tercero cerca del cristalino o en la muñeca de la mano.

6.1.15 Distancia operador-haz de radiación. Aumentar la distancia del haz de radiación disminuye el riesgo de exposición, al duplicar la distancia entre el haz principal y el operador, se reduce la exposición en un factor de cuatro. La exposición a la radiación también varía según el ángulo en el que se proyecta el tubo de rayos X. Las proyecciones oblicuas (oblicua anterior izquierda y derecha) y las angulaciones pronunciadas aumentan la exposición a la radiación, que a menudo se emplean para mejorar la visualización. Las angulaciones de 60° dan hasta tres veces la dosis del operador que las angulaciones de 30°. El segundo operador o asistente generalmente está menos expuesto a la radiación en comparación con el primer operador, pero tiene un riesgo mayor que el resto del personal en la sala de operaciones.

6.1.16 Angulación de rayos X y posicionamiento del paciente. El aumento de la angulación del equipo de imágenes (es decir, de 30 a 60 grados) también aumenta la dosis de radiación durante las imágenes de fluoroscopia y cine. La dispersión de la radiación es el mecanismo principal de exposición del operador y del personal. Varios factores pueden afectar sustancialmente la dispersión de la radiación, incluido el grosor del haz de rayos X, la posición del paciente, el área de la superficie corporal del paciente, el sitio de acceso, la configuración de fluoroscopia y adquisición, la filtración, el blindaje y la angulación. El acceso radial aumenta la exposición al reducir la distancia entre el haz de rayos X y el operador; por lo tanto, es importante utilizar varias extensiones y colocar al operador lo más cerca posible de los pies del paciente. La altura de la mesa del paciente puede afectar significativamente la dispersión. El receptor de imagen debe estar lo más cerca posible del paciente.

6.1.17 Intervención coronaria percutánea robótica. Las modalidades futuras, como el uso de sistemas robóticos para realizar PCI, darán como resultado una reducción drástica en la exposición del operador. Los sistemas robóticos controlados a distancia se han desarrollado para abordar los riesgos laborales para los intervencionistas, como la exposición crónica a la radiación, debido a tiempos prolongados de uso de fluoroscopia.

Todas las consideraciones anteriores son instrumentos técnicos que permiten reducir la exposición de la radiación dispersa alrededor de un equipo de arco en C. Se recomienda seguir con cuidado cada uno de los tópicos y considerar las diez acciones del llamado de Bonn a la acción para personal del staff (IAEA 2012).

6.2 Parámetros no técnicos para reducir la dosis de radiación

En la actualidad, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la secretaria del Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), junto con el Organismo Internacional de energía Atómica (OIEA) promueven y ayudan a mejorar y profundizar los conocimientos de los efectos adversos de los rayos X para el POE y el paciente, haciendo énfasis en la reducción de la dosis utilizando parámetros no técnicos.

6.2.1 Capacitación de cardiólogos en protección radiológica. La protección radiológica y la capacitación integral en el uso correcto de las medidas de protección disponibles deben ser parte del plan de los programas en la subespecialidad de CI. Aunque, en las salas de CI los procedimientos

son realizados por expertos médicos especialistas acompañados de enfermeras, técnicos radiólogos y personal de apoyo. Sin embargo, todos los operadores deben recibir un intenso entrenamiento capacitación específica en protección radiológica (IAEA 2012, ICRP 2017), ésta debe incluir la revisión de los posibles efectos adversos de la radiación en los pacientes y el personal, el funcionamiento seguro del equipo fluoroscópico, la evaluación de los factores que afectan las dosis del paciente y del personal, además de las medidas que se pueden tomar para reducir la dosis. Se debe informar a los operadores sobre cómo calcular la dosis del paciente utilizando los informes de dosis DICOM u otros parámetros sustitutos de la exposición a la radiación (NCRP 2014). El Físico Médico es indispensable en los servicios de cardiología intervencionista, aunque esta no es una especialidad nueva, en México no se cuenta con el reconocimiento de la figura del Físico Médico en salas de CI. Las autoridades de salud pueden contribuir de un modo importante al desarrollo, la consolidación y el reconocimiento de esta especialidad. Por lo tanto, la capacitación y entrenamiento especializado constituye un componente esencial en la implementación de programas de protección radiológica, dada su importancia para la seguridad del uso de los equipos generadores de rayos X (ICRU 2009). El adiestramiento en seguridad y protección radiológica de forma continua en el personal de CI adquiere singular relevancia en las buenas prácticas y en la optimización de las dosis durante los procedimientos especialmente para los pacientes durante la exposición médica.

6.2.2 Trabajo en equipo. El trabajo en equipo en cardiología intervencionista reviste de suma importancia, en el que se debe participar todos para la reducción de la dosis de radiación en la sala, personal médico, técnico, de apoyo y administrativo, Físico Médico, y autoridad regulatoria. El organismo regulador en México para la generación y manejo de los rayos X es la COFEPRIS, organismo que tiene la facultad de establecer normas de protección radiológica y verificar su cumplimiento durante todas las etapas de desarrollo de las diferentes prácticas que empleen fuentes de radiación ionizante, sin embargo, la norma oficial tiene más de 20 años de vigencia. Se debe recordar que en condiciones normales, las dosis de radiación que reciben las personas no provocan alarma sensorial ni manifestaciones clínicas inmediatas, aunque ello no significa que los riesgos sean nulos ni pequeños. Por consiguiente, la autoridad reguladora debe exigir que en cada instalación de CI cuente un Físico Médico que organice un grupo multidisciplinario a favor de la PR.

7. Implementación de la cultura de la protección radiológica en CI

Optimizar la protección radiológica en una sala de CI, significa comprender que el uso de los rayos X tiene muchos beneficios, que su uso conduce a la exposición inevitable de algunas personas que utilizar todos los sistemas de protección recibirán menos dosis de radiación. Pero, ¿hasta dónde se deben reducir las dosis? La respuesta no la pueden proporcionar solamente los estudios científicos; también es necesario tener en cuenta las condiciones económicas y sociales imperantes del país. Aunque organismos internacionales determinen las pautas (límites para el POE y valores de referencia para el paciente), está en todos nosotros el realizar los procedimientos de intervencionismo con las buenas prácticas preservando en todo momento los mecanismos de reducción de la dosis. Por consiguiente, el concepto de optimización es un criterio genérico —sin alusiones a valores específicos— que ha pasado a tener mayor trascendencia que los límites numéricos. Según la CIPR, se deben reducir las dosis individuales de radiación, el número de personas expuestas y la probabilidad de que ocurran exposiciones accidentales tanto como sea razonablemente posible teniendo en cuenta los factores económicos y sociales. De este modo, organismos reguladores, personal de salud y el físico médico trabajar en armonía creando la compatibilidad y responsabilidad bajo el criterio de la cultura de la protección radiológica.

Conclusiones

Un programa de protección radiológica es una herramienta esencial de la administración de calidad para una sala de cateterismo. Este debe ser un esfuerzo integral de personal de salud

(médicos cardiólogos, técnico radiólogo, enfermera, físicos médicos y personal administrativo) y organismos regulador. Los médicos cardiólogos intervencionistas son una parte esencial de este proceso y deben garantizar los mejores resultados posibles para los pacientes. Es primordial que los profesionales de CI conozcan las diferentes normas oficiales tanto nacionales como internacionales para la optimización de la dosis durante los procedimientos.

La implementación de programas de protección radiológica es fundamental para reducir las dosis ocupacionales y del paciente, en consecuencia, reducir la probabilidad de ocurrencia de los efectos estocásticos a largo plazo y prevenir la ocurrencia de las reacciones tisulares en los pacientes. Estos programas requieren del entrenamiento apropiado de los cardiólogos intervencionistas. La monitorización de las dosis en este tipo de procedimientos es importante para demostrar el cumplimiento de los límites de dosis establecidos por los organismos reguladores. Debido a que la capacitación formal en protección radiológica es eficaz para reducir la exposición a la radiación, la capacitación obligatoria de los residentes y la capacitación periódica de los operadores experimentados es imperativa.

El organismo regulador, el físico médico y junto con el personal de salud de los hospitales deben jugar un papel protagónico en la protección del paciente en la implementación de medidas eficaces de protección radiológica y de procedimientos adecuados de garantía de la calidad. Para ello, se deben capacitar al personal médico, técnico y de apoyo con conocimientos en materia de protección radiológica, promover el uso del equipo adecuado y aplicar procedimientos apropiados de garantía de la calidad.

Finalmente, el uso frecuente y la posición correcta de los dosímetros personales en Cardiología intervencionista permiten optimizar las dosis ocupacionales y facilitar así el análisis y la comparación con los límites de dosis establecidos en la normatividad, manteniendo las dosis muy por debajo del límite de dosis efectiva anual de 20 mSv. Como no es posible mejorar lo que no se mide o lo que no se conoce, hay que insistir en la conveniencia de implementar la cultura de la protección radiológica, para ello se debe trabajar en conjunto personal de salud, especialistas en física médica y organismos reguladores.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no se encuentran en situación de conflicto de intereses con respecto al contenido de este trabajo.

Referencias

- Brambilla M, Vassileva J, Kuchcinska A, Rehani MM. Multinational data on cumulative radiation exposure of patients from recurrent radiological procedures: call for action. *Eur Radiol.* 2020;30(5):2493–501.
- Favaloro R. Saphenous vein autograf replacement of severe segmental coronary artery occlusion: operative technique. *Ann Thorac Surg.* 1968;5:334-9.
- Forssman W. Experiments on myself. *Memories of a Surgeon in Germany.* Saint Martin Press, New York, 1974. p.79,651-660
- Gruentzig A, Senning A, Siegenthaler W. Non – operative dilatation of coronary artery stenosis: percutaneous transluminal coronary angioplasty. *N Eng J Med.* 1979;301:61-68
- Haga Y., Chida K., Sota M., Meguro T., Zuguchi M. Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. (2017) *Scientific Reports.* 7:569
- IAEA, 2009. Establishing guidance levels in X-ray guided medical interventional procedures: a pilot study, Vienna; 2009. /Safety Reports Series, n. 59).
- IAEA, 2012. International Atomic Energy Agency and World Health O [accessed 13 F 2020]. Bonn Call for Action 2012. <https://www.iaea.org/sites/default/files/17/12/bonn-call-for-action.pdf> (accessed October 13, 2020).
- IAEA, 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna: 2014.

- IAEA-SAFRAD 2020. Radiation protection of patients (RPOP) SAFRAD (SAFety in RADiological procedures). <https://rpop.iaea.org/safrad/>. Accessed 11.15.2020.
- ICRP 1991. ICRP Publication No. 60. The 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann ICRP*. 1991;21:1–3.
- ICRP 2001. ICRP Publication No. 85. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. *Ann ICRP*. 2001;30(2):1–67..
- ICRP 2013. ICRP Publication 120: Radiological protection in cardiology. *Ann ICRP.*, 42 (2013), pp. 1-125.
- ICRP 2017. ICRP Publication 135: Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. *Ann ICRP*. 2017;46:1-144.
- ICRU 1993. ICRU Report No. 51. Quantities and units in radiation protection dosimetry. Oxford: ICRU; 1993.
- ICRU 2009. ICRP publication 113. Education and training in radiological protection for diagnostic and interventional procedures. *Ann ICRP*. 2009;39(5):7–68.
- Jaschke W., Schmuth M., Trianni A., Bartal G. Radiation induced skin injuries to patients: What the interventional radiologist needs to know. *Cardiovasc. Intervent Radiol*. 2017; 40 (8): 1131 - 1140
- Kan J, White R, Mitchell S, Gardner T. Percutaneous Ballon valvuloplasty: a new method for treating congenital pulmonary valve stenosis. *N Engl J med*.1982;307:540-54
- Limón-Lasón R, Rubio Alvarez V, Bouchard F. Intracardiac catheterization of the left cavities in man; simultaneous registering of pressure and intracavitary electrocardiogram. *ArchInst Cardiol Mex*. 1950;20:271-85.
- Malchair F., Dabin J., Deleu M., Sans Merce M., Ciraj Bjelac O., Gallagher A., Maccia C. Review of skin calculation software in interventional cardiology. *Physica Medica*. Vol. 80, (2020): 75-85
- NCRP 2010. NCRP report No.168: Radiation dose management for fluoroscopically-guided interventional medical procedures; 2010.
- NCRP 2014. Outline of administrative policies for quality assurance and peer review of tissue reactions associated with fluoroscopically-guided interventions, (2014).
- NOM-012-STPS-2012. NORMA Oficial Mexicana, DOF. Condiciones de seguridad y salud en los centros de trabajo donde se manejen fuentes de radiación ionizante.
- NOM-229-SSA1-2002. NORMA Oficial Mexicana, DOF. Salud ambiental. Requisitos técnicos para las instalaciones, responsabilidades sanitarias, especificaciones técnicas para los equipos y protección radiológica en establecimientos de diagnóstico médico con rayos X.
- Pérgola F, Okner O. Historia de la Cardiología. Biblioteca de Temas Médicos. Buenos Aires.Edimed; 1987.p. 311.
- Rivera-Montalvo T. and Uruchurtu-Chavarín E.S. Scattered radiation on cardiologists during interventional cardiac procedure. *Radiat. Phys. Chem*. 167 (2020) 108274.
- Seibold P, Auvinen A, Averbek D, Bourguignon M, Hartikainen JM, Hoeschen C, et al. Clinical and epidemiological observations on individual radiation sensitivity and susceptibility. *Int J Radiat Biol*. 2020;96(3):324–39.
- Sones M, Shirey E Proudfit W, Wescott R. Cine Coronary arteriography. *Circulation* 1959;20:773-6.
- UNSCEAR, 2017. Sources, effects and risks of ionizing radiation; report to the general assembly, with scientific annexes. New York: UNSCEAR (2017).
- Vano E, Kleiman NJ, Duran A, Romano-Miller M, Rehani MM. Radiation-associated lens opacities in catheterization personnel: results of a survey and direct assessments. *J Vasc Interv Radiol*. 2013;24:197-204.