

Protección y seguridad radiológicas

Gustavo E. Saravia-Rivera

RESUMEN

Estamos expuestos a dos fuentes de radiación, una natural o de fondo que procede del espacio cósmico y de otras fuentes naturales (materiales primigenios de nuestro planeta) y otra artificial (industrial, producto de procedimientos radiológicos, bélicos o debida a accidentes en el manejo de sustancias radioactivas). La radiobiología es la ciencia que estudia los fenómenos que se producen en los seres vivos tras la absorción de energía procedente de las radiaciones ionizantes. La protección radiológica es una herramienta para el manejo de las medidas de cuidado de la salud contra los riesgos generados por el uso de radiación ionizante, tanto para las personas como para el ambiente. Los objetivos de la protección y de la seguridad radiológicas son: evitar los efectos nocivos reconocidos y predecibles (determinísticos) de la radiación ionizante y limitar los efectos estocásticos a máximos aceptables. Nuestra norma (NOM-229-SSA1-2002) se basa en las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés) de 1977. Los límites anuales aceptables de radiación son: ocupacional 50 mSv y público de 5 mSv.

Palabras clave: radiación ionizante, radiobiología, efectos nocivos, efectos estocásticos, protección radiológica, norma NOM-229-SSA1-2002.

ABSTRACT

We are exposed to two sources of radiation, natural or background radiation which comes from cosmic space and from other natural sources (primitive materials of our planet) and another artificial (industrial, produced by radiological procedures, warfare, or accidents in handling radioactive substances). Radiobiology is the science that studies phenomena produced in life forms following absorption of energy from ionizing radiation. Radiological protection is a tool to manage healthcare measures against risks produced by use of ionizing radiation, both for persons and for the environment. The objectives of radiological protection and safety are: prevent recognized and predictable harmful (deterministic) effects of ionizing radiation and limit the stochastic effects to acceptable maximums. Our standard (NOM-229-SSA1-2002) is based on the recommendations of the International Commission for Radiological Protection (ICRP) of 1977. The acceptable annual limits of radiation are: occupational 50 mSv and public 5 mSv.

Key words: ionizing radiation, radiobiology, determinist effects, stochastic effects, radiological protection, standard NOM-229-SSA1-2002.

INTRODUCCIÓN

Es innegable que la radiación forma parte de la humanidad, ya sea la radiación de origen natural o artificial, más aún en los profesionales médicos (radiólogos, médicos nucleares, cardiólogos, gastroenterólogos, cirujanos, urólogos, traumatólogos, ortopedistas, anestesiólogos, etc.) sin mencionar a otros profesionales de otros campos que la utilizan o están en contacto con ella en su actividad diaria, es así que es necesario conocer los efectos que causa la radiación ionizante en los seres vivos, campo que estudia

la radiobiología, para comprender que no es una energía inocua pero tampoco indomable ni incontrolable. El objetivo de este artículo no es incentivar el pánico sino la conciencia para evitar tantas lesiones radioinducidas. No olviden que las secuelas de la bomba atómica en la Segunda Guerra Mundial y del accidente nuclear de Chernobil son apenas dos grandes ejemplos de lo que la radiación ionizante puede causar, estos dos grandes laboratorios enseñaron a la comunidad científica a establecer normas necesarias para la protección y seguridad radiológicas.

Radiación natural y artificial

Comenzaré haciéndoles algunas preguntas, ¿hay radiación en el lugar en el que se encuentran?, seguramente en alguna ocasión escucharon a algún Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE) afirmar que la lectura de su dosímetro era errónea porque el dispositivo estuvo guardado en su

CT Scanner de México. Puebla 228, Col. Roma, 06700, México, D.F.

Correspondencia: Gustavo E. Saravia Rivera. Correo electrónico: arabiagooze@hotmail.com

Recibido: 3 de septiembre 2012

Aceptado: 28 de febrero 2013

casillero todo el mes y nunca recibió radiación alguna, el dosímetro estará dañado dando una lectura errónea?, ¿que sucedió?

La respuesta es sencilla, la lectura del dosímetro ante la falta de una fuente de radiación “conocida” no hace más que afirmar la existencia de una radiación natural, también conocida como radiación de fondo. Dentro de esta clase de radiación se encuentra la radiación cósmica, la radiación de los materiales que nos rodean (por ejemplo, donde habitamos) y de algunas sustancias que ingerimos y bebemos. La cantidad de radiación natural que recibimos también depende del área geográfica donde nos encontremos, a nivel del mar esta radiación se calcula en 0.03 mSv/h pero a la altura de un vuelo supersónico ésta será de 10 mSv/h. La radiación natural corresponde aproximadamente a 87% de la radiación que recibimos y se calcula que es de 1 a 3 mSv/año, pudiendo ser de 3 a 13 mSv/año en lugares de alta radiación natural.

El otro tipo de radiación es la creada por el ser humano, es la radiación artificial y se la encuentra en objetos que usamos (televisores, relojes, pantallas de ordenadores, etc., estimándose que recibimos una radiación de 7 mSv/año), plantas eléctricas nucleares (2.4 mSv/año), en explosiones militares nucleares (10 mSv/año) y en aplicaciones médicas (radioterapia con una dosis de 10 mSv/año, estudios de medicina nuclear con 20 mSv/año y estudios de radiodiagnóstico con 500 mSv/año). La radiación artificial corresponde con 13% de la radiación que recibimos y se calcula en 550 mSv/año.¹⁻³

La dosis que recibimos por radiodiagnóstico se calcula en 1.5 a 2 mSv/año, los dedicados a la radioterapia reciben 2 a 3 mSv/año y los de medicina nuclear 2.5 a 8 mSv/año.¹

Necesitamos protegernos de la radiación? ¿Cuáles son los efectos de la radiación? ¿Puede causarnos la muerte?

Radiobiología

La radiobiología es la ciencia que estudia los fenómenos que se producen en los seres vivos tras la absorción de energía procedente de las radiaciones ionizantes. Se describen las siguientes etapas:^{1,4,5}

a) **Etapa física:** puede tardar 10^{-16} s, tiempo en el cual la energía se deposita en la célula y causa ionización. Se estima que un Gray de dosis absorbida produce 100 000

ionizaciones en un volumen de 10 micras cúbicas. Los efectos biológicos se deben en gran parte a la acción de las radiaciones sobre el agua, no olvidar por un lado la elevada presencia de las moléculas de agua en los seres vivos y por el otro lado el hecho de que el agua actúa como disolvente de otras moléculas y en el que tienen lugar importantes reacciones químicas.

- b) **Etapa fisicoquímica:** tarda alrededor de 10^{-16} s en la cual los iones interactúan con otras moléculas de agua dando nuevos productos. Los productos OH y H son llamados radicales libres debido a que tienen un electrón no apareado y son químicamente muy activos. El organismo trata de neutralizar los radicales libres haciéndolos reaccionar entre ellos dando H_2 (H+H), H_2O_2 (OH+OH) y H_2O (H+OH).
- c) **Etapa química:** dura entre una millonésima de segundo y unos cuantos segundos, tiempo en el cual los radicales libres y agentes oxidantes interactúan con moléculas orgánicas de la célula, por ejemplo los cromosomas, y producen la inducción de un cierto grado de lesión biológica.
- d) **Etapa biológica:** en la cual la escala de tiempo puede variar de decenas de minutos a decenas de años. La etapa biológica se inicia con la activación de reacciones enzimáticas para reparar el daño producido por las radiaciones. Luego de la exposición a la radiación y daño del ADN hay 3 posibles caminos, algunas de estas lesiones serán reparadas y no influyen en la viabilidad celular, otras no serán reparadas con lo que se producirá retardo en la división celular o la muerte celular temprana (apoptosis), o incluso después de varias divisiones celulares tras la exposición a la radiación, y finalmente la célula puede sufrir alguna transformación.

Los efectos de la radiación se pueden clasificar según el tiempo de aparición en:

- a) **Precoces:** aparecen en minutos u horas después de haberse expuesto a la radiación; por ejemplo eritema cutáneo y náuseas.
- b) **Tardíos:** aparecen en meses o años después de la exposición; por ejemplo cáncer radioinducido, radiodermatitis crónica y mutaciones genéticas.

Desde el punto de vista biológico se clasifican en:

a) **Efectos somáticos:** sólo se manifiestan en el individuo que ha sido sometido a la exposición de radiaciones io-

nizantes, por ejemplo el eritema. Se estima que con 5 Sv ya se presentan efectos somáticos.

- b) **Efectos hereditarios:** no se manifiestan en el individuo que ha sido expuesto a la radiación sino en su descendencia, ya que se lesionan las células germinales del individuo expuesto, por ejemplo las mutaciones genéticas.

Según la dependencia de la dosis en:

- a) **Efectos estocásticos:** son efectos absolutamente aleatorios, probabilísticos; pudiendo aparecer tras la exposición a pequeñas dosis de radiación ionizante. No necesitan una dosis umbral determinada para producirse; si bien al aumentar la dosis aumenta la probabilidad de aparición de estos efectos que suelen ser de tipo tardío. Generalmente ocurren en células aisladas. Se cree que los únicos efectos estocásticos son el cáncer radioinducido y las mutaciones genéticas.
- b) **Efectos no estocásticos (determinísticos):** se necesita de una dosis umbral para producirlos, por debajo de la cual la probabilidad de aparición de los mismos es muy baja. Suelen ser efectos precoces, la severidad de los efectos se incrementa con la dosis, generalmente un gran número de células están involucradas, por ejemplo el eritema cutáneo.

Efectos tempranos

Los efectos tempranos son debidos a la reducción de la población celular de algunos órganos debido al aniquilamiento y al retardo de la división celular. Dosis agudas arriba de 1 Gy a cuerpo entero provocan náuseas y vómitos a las pocas horas de la exposición, el llamado síndrome por radiación. Dosis arriba de 2 Gy pueden provocar la muerte probablemente 10 o 15 días luego de la exposición. La probabilidad de sobrevivir a una dosis aguda de 8 Gy sería muy baja. Una estimación razonable puede ser hecha de la dosis que pueda ser letal para 50% de los individuos expuestos dentro de los 30 días después de la exposición, a esta dosis se llama LD 30/50 y tiene un valor de 3 Gy para el ser humano.

El rango de dosis de 3 a 10 Gy se le llama la región de muerte por infección y se debe principalmente a infecciones secundarias debido a reducción de los glóbulos blancos.

Por arriba de 10 Gy la supervivencia cae entre 3 y 5 días, se produce daño de las paredes del intestino seguido de

severa invasión bacteriana, se llama región de muerte gastrointestinal.

Los síntomas a dosis mucho más altas indican daño del sistema nervioso central, de aquí que esta región se llame región de muerte del SNC.

Una exposición de 3 Gy de rayos X de baja energía dará como resultado eritema y exposiciones mayores pueden provocar pigmentación, ampollas y ulceración.

Los niveles de exposición tanto para el POE como para el público, que resultan de aplicaciones industriales y médicas de los rayos X, están muy por debajo de los niveles que inducirían efectos tempranos. Tal cantidad de dosis solamente puede ser recibida en eventos como accidentes nucleares. Sin embargo, las dosis bajas recibidas en operaciones normales pueden causar efectos dañinos a largo plazo.^{1,4,5}

Efectos tardíos

En los primeros años del siglo XX los radiólogos y sus pacientes, quienes estuvieron expuestos a dosis relativamente altas de radiación, mostraron una incidencia alta de ciertos tipos de cáncer en comparación con los individuos que no habían estado expuestos a radiación. Posteriormente, el estudio de las poblaciones expuestas a la radiación de las bombas atómicas, de los expuestos a radioterapia y de grupos expuestos ocupacionalmente, particularmente en minas de uranio, han confirmado la capacidad de la radiación para inducir cáncer.

Los efectos hereditarios de la radiación resultan del daño a las células reproductoras. Este daño toma la forma de alteraciones conocidas como mutaciones genéticas en el material hereditario de la célula.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) estima que el riesgo de un daño hereditario serio dentro de las primeras 2 generaciones seguidas a la exposición de la radiación de cualquiera de los padres es de alrededor 10/1 000 000 por mSv.^{1,4,5}

Radiosensibilidad

Se define como la probabilidad de una célula, tejido u órgano de sufrir algún efecto por unidad de dosis. La radiosensibilidad será mayor si la célula es altamente micó-

tica, indiferenciada y con alta probabilidad de malignidad. Dentro los altamente radiosensibles tenemos a la médula ósea, bazo, timo, ganglios linfáticos, gónadas, cristalino, etc. Los menos radiosensibles son el hueso, músculo y sistema nervioso.^{6,7}

Radiación y embarazo

La radiosensibilidad del producto y de sus órganos decrece a medida que avanza el tiempo después de la concepción. No es sencillo establecer una causa efecto debido a la presencia de muchos agentes teratogénicos y debido a que los efectos de la radiación no son específicos ni únicos.

La exposición a la radiación en esta situación puede provocar 3 clases de efectos: muerte, anomalías congénitas o efectos tardíos (cáncer y defectos hereditarios).

Se puede provocar la muerte del producto con dosis tan pequeñas como de 0.1 Gy antes o después de la implantación del embrión en la pared uterina, o con dosis más altas durante el resto del desarrollo intrauterino. La ICRP ha establecido que un retardo mental (IQ < 100) puede ser inducido por la exposición a la radiación, sobre todo en el periodo de mayor radiosensibilidad (semanas 8 a 15).^{6,7,8}

Como podemos ver, aún podemos vivir con dosis de 3 hasta 8 mSv; sin embargo, dosis de 3 000 mSv nos pueden matar, entonces, ¿cuál es el punto seguro donde nos debemos detener?

Protección y seguridad radiológica

La protección radiológica es una herramienta para el manejo de las medidas de protección de la salud contra los riesgos generados por el uso de radiación ionizante tanto para las personas como para el medio ambiente. Los objetivos de la protección y seguridad radiológicas es: evitar los efectos deterministas y limitar los efectos estocásticos a niveles aceptables. Los efectos estocásticos son los que se producen a dosis bajas, que es lo que comúnmente ocurre en radiología médica, motivo por el cual son los que son considerados.

Las organizaciones relevantes en la protección radiológica son 3: la ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica) que se encarga de hacer conocer las recomendaciones, el IAEA (Organismo Internacional de Energía

atómica) que establece los estándares de seguridad y se encarga de su aplicación y el UNSCEAR (Comité Científico de Naciones Unidas sobre los efectos de la Radiación Atómica) que estudia los efectos de la radiación atómica.^{1,9}

Tipos de exposición

Ha tres tipos de exposición:^{1,6,8-11}

- a) **Exposición médica:** principalmente incluye la exposición de las personas (pacientes) como parte de un diagnóstico o tratamiento.
- b) **Exposición ocupacional:** exposición relacionada con la práctica profesional.
- c) **Exposición pública:** incluye el resto de las exposiciones y se refiere a las personas que ocasionalmente están expuestas a la radiación; por ejemplo: personal administrativo, de limpieza, de mantenimiento, etc.

La exposición médica no solo incluye a los pacientes sino también a los individuos como familiares y amigos que, a sabiendas del riesgo y por voluntad propia, colaboran con el paciente en algún procedimiento. También se incluye a voluntarios que forman parte de alguna investigación.

La NOM-229-SSA1-2002

La NOM-229-SSA1-2002 define al Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE) como “la persona que en ejercicio y con motivo de su ocupación está expuesta a la radiación ionizante. Quedan excluidos los trabajadores que ocasionalmente en el curso de su trabajo puedan estar expuestos a este tipo de radiación”. El POE debe ser mayor de 18 años.

Para el POE, en la norma NOM-229-SSA1-2002, basada en el Reglamento General de Seguridad Radiológica publicado en el Diario Oficial del 15 de septiembre de 2006, se establece para los efectos estocásticos un límite anual de dosis de 50 mSv.^{1,8,10}

Para el público (personal que ocasionalmente puede estar expuesto a las radiaciones) se establece para los efectos estocásticos un límite anual de dosis de 5 mSv.

Basados en estos límites se consideran límites de dosis semanales de 1.0 y 0.1 mSv, respectivamente, para POE y público.

Estos límites fueron recomendados por la ICRP desde 1931, estableciendo en un inicio un límite de dosis anual ocupacional de 500 mSv. Para 1947 este límite fue reducido a 150 mSv, en 1977 fue de 50 mSv y desde 1990 el límite de dosis anual ocupacional recomendado es de 20 mSv y el límite de dosis anual público es de 1 mSv. El estudio de dos acontecimientos mundiales influenciaron en la reducción de los límites en 1947 y 1990, la bomba atómica (6 de agosto de 1945) y el accidente nuclear de Chernóbil (26 de abril de 1986).

Nuestra norma (NOM-229-SSA1-2002) se basa en las recomendaciones de la ICRP de 1977, por lo que los límites anuales son: ocupacional 50 mSv y público de 5 mSv.

En la práctica, el promedio de dosis anual que se recibe en Radiología Médica en México, está por debajo de los 10 mSv al año.¹

En la exposición médica (para el paciente) no se establece ningún límite, simplemente la recomendación de que las dosis recibidas por los pacientes sean tan bajas como sea razonablemente posible y compatible con la calidad de la imagen radiológica. Este principio de limitación de dosis es reflejado en las siglas ALARA (“As Low As Reasonably Achievable” en inglés o “tan bajo como sea razonablemente posible” en español). Aunque una recomendación esté *justificada* porque el beneficio reportado es mayor que las desventajas, y *optimizada* según la tecnología, se intentará por todos los medios posibles que la dosis recibida por cualquier individuo, sea lo más baja posible.^{1,6,8-11}

En la exposición ocupacional los límites de dosis anual equivalente son de:

- a) Cristalino: 150 mSv/año.
- b) Piel: 500 mSv/año.
- c) Manos y pies: 500 mSv/año.

En la exposición pública los límites de dosis anual equivalente son de:

- d) Cristalino: 15 mSv/año.
- e) Piel: 50 mSv/año.

Para los estudiantes y aprendices entre 16 y 18 años, su exposición ocupacional debe ser controlada de tal manera que no rebasen los siguientes límites:

- a) Dosis efectiva: 6 mSv/año.
- b) Dosis equivalente a cristalino: 50 mSv/año.
- c) Dosis equivalente a piel y extremidades: 150 mSv/año.

La trabajadora femenina que se encuentre embarazada deberá notificar a su empleador de tal manera que si son necesarias se modifiquen las condiciones de trabajo. La notificación del embarazo no debe ser considerada como una razón para excluirla del trabajo. Se debe asegurar que la exposición ocupacional de la madre, y por consiguiente del producto, no alcance los niveles de la exposición pública.^{7,8}

Pilares del sistema de protección radiológica

El sistema de protección radiológica se basa en tres pilares:^{1,3,8,11}

- a) Justificación de las prácticas.
 - b) Optimización.
 - c) Limitación de la dosis.
- a) Justificación:** toda exposición siempre estará debidamente justificada, debe representar un beneficio neto y positivo para la persona expuesta, siendo la mejor de las opciones existentes, tanto para el individuo como para la sociedad en su conjunto. La mayoría de las valoraciones necesarias para justificar una práctica se basan en la experiencia, juicio profesional y sentido común.
- b) Optimización:** todas las acciones deberán estar realizadas de forma tal que estén hechas en el mejor modo posible según la tecnología existente en el momento y el grado de conocimiento humano que se posea. La optimización significa que la dosis deberá ser tan baja como sea razonablemente posible (ALARA) tomando en cuenta los factores económicos y sociales. Muchas veces la optimización en radiología diagnóstica no necesariamente significa la reducción de la dosis al paciente, las rejillas antidifusoras mejoran el contraste y resolución de la imagen pero incrementan la dosis del paciente por un factor de 2 a 4.
- c) Limitación de la dosis:** se recomiendan dosis límite de referencia y se dan consejos.

Factores básicos de protección radiológica

Tenemos tres factores básicos de protección radiológica:^{1,3,8,11}

- a) **Tiempo:** la dosis a la que las personas están expuestas dependen directamente del tiempo. En otras palabras, mientras más placas usemos o mayor sea el tiempo de fluoroscopia debemos esperar mayor dosis al paciente, al POE y al público.
- b) **Distancia:** la dosis en relación con la distancia varía a razón inversa del cuadrado de la distancia, a un metro recibimos una exposición de 1, a 2 metros se reducirá por un factor de $2^2 = 4$, a 5 metros se reducirá por un factor de $5^2 = 25$.

$$\text{Fórmula: } I = I_0/d^2$$

- c) **Barreras:** ejemplos de barreras tenemos en la coraza del tubo, las paredes emplomadas o baritadas de las salas de rayos X, los mandiles y guantes emplomados, etc. En rayos X es rara la situación en la que se requiere de espesores superiores a 2 mm de plomo (Pb) en las paredes para tener una protección adecuada, con fuentes radioactivas como el Co-60 se requiere de varios centímetros de plomo o de concreto. Las barreras pueden ser de dos tipos:
- Barreras primarias: blindaje donde incide directamente el haz de radiación útil.
 - Barrera secundaria: blindaje en el cual incide sólo la radiación de fuga y la radiación dispersa.

CONCLUSIÓN

Los niveles de exposición tanto para trabajadores como para el público que resultan de aplicaciones industriales y médicas de los rayos X están muy por debajo de los niveles que inducirían efectos tempranos. Sin embargo, es conocido que las dosis bajas recibidas en operaciones normales pueden causar efectos dañinos a largo plazo (cáncer y mutaciones genéticas). A esto se suma el cada vez mayor uso de métodos que utilizan radiación ionizante como la tomografía computada y los procedimientos de intervención radiológica que provocan lesiones cutáneas radioinducidas en los pacientes debido a las altas dosis innecesariamente aplicadas, sobre todo en los procedimientos intervencionistas. No olvidar que la exposición médica (para el paciente) no establece ningún límite; sin embargo, se recomienda que la dosis recibida por los pacientes sea

tan baja como sea razonablemente posible. No olvidar que los pacientes jóvenes son más vulnerables al riesgo de cáncer. Lastimosamente, muchos profesionales médicos no cuentan con los conocimientos suficientes respecto a la protección y seguridad radiológica, o simplemente no aplican los factores básicos de protección radiológica ni el principio de limitación de dosis ALARA.

Nota del editor: el término determinístico no existe en español y el determinismo es una doctrina filosófica no aplicable a entes inanimados como la radiación. Aunque los autores hacen referencia a los efectos cuantificables (determinables) y no cuantificables (indeterminables) de la radiación ionizante se conservaron las categorías “determinístico” y “determinista” a solicitud expresa del autor.

Referencias

1. Asesores en Radiaciones S.A. (ARSA). Curso Teórico-Práctico de Protección y Seguridad Radiológica en el Diagnóstico Médico con Rayos X.
2. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Sources and Effects of Ionizing Radiation. New York, United Nations 2000.
3. ICRP Publication 33. Protection against ionizing radiation from external sources used in medicine. Pergamon Press 1982.
4. Gregg EC. Effects of ionizing radiation on humans. In Waggener RG and Kereikas JG, editors. Handbook of medical physics, Volume II. Boca Raton: CRC Press Inc., 1984.
5. Wahlstrom B. Understanding Radiation. Madison, WI: Medical Physics Publishing, 1995. ISBN 0-944838-62-6.
6. ICRP Publication 60. 1990 Recommendations of the ICRP. Pergamon Press 1991.
7. IAEA. International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. 115, Safety Standards, February 1996.
8. ICRP Publication 57. Radiological protection of the worker in medicine and dentistry. Pergamon Press 1989.
9. ICRP 73. Radiological Protection and Safety in Medicine. Annals of the ICRP 1996;26(2).
10. Secretaría de Salud, Diario oficial, Norma NOM-229-SSA1-2002, Viernes 15 de septiembre de 2006.
11. ICRP Publication 73. Radiological protection and safety in medicine. Pergamon 1996.