

introducción

La radiación ionizante siempre estuvo presente en el ambiente, y la humanidad ha estado expuesta a ella desde sus orígenes. En la actualidad la radiación ionizante procede de fuentes muy diversas, algunas de ellas naturales y otras resultado de la actividad del hombre. Las radiaciones ionizantes aportan significativos beneficios a la sociedad, en áreas tan diversas como, por ejemplo, la medicina, la generación de energía eléctrica, la industria y la agricultura. No obstante, estos beneficios, para ser aceptables, no deben implicar riesgos que excedan los normalmente admitidos en la vida diaria.

Las radiaciones de origen natural son: la radiación cósmica, la radiación emitida por los elementos radiactivos presentes en la corteza terrestre y la irradiación interna debida a dichos radionucleidos -inhalados o ingeridos con la comida o la bebida- retenidos en el cuerpo. La importancia de estas exposiciones naturales depende de la ubicación geográfica y en algunos casos de ciertas acciones humanas. La altura sobre el nivel del mar afecta la tasa de dosis de radiación cósmica, la radiación del suelo está directamente relacionada a la geología local, y la dosis debida al gas radón, que pasa del suelo a las casas, depende tanto de la geología local como del tipo de la construcción y la ventilación de las viviendas. La exposición debida a los rayos cósmicos, a los rayos gamma terrestres y al material radiactivo retenido en el cuerpo varían sólo ligeramente con el tiempo, de manera que la exposición a estas fuentes puede considerarse el fondo básico de radiación natural. Entre las fuentes de radiación creadas por el hombre están las máquinas generadas de rayos x, los aceleradores de partículas, los reactores nucleares que se usan en la investigación y en la producción de energía eléctrica, y los radionucleidos que se usan en medicina, en investigación y en operaciones industriales. Los ensayos de armas nucleares (bombas atómicas y de hidrógeno) hechos en el pasado siguen contribuyendo a la exposición de la población mundial. La exposición profesional, esto es, la exposición de trabajadores, está muy difundida, pero en realidad afecta a grupos pequeños.

Las radiaciones ionizantes -de no tomarse precauciones adecuadas- pueden provocar efectos nocivos sobre la salud de las personas que se exponen a ellas, efectos que se denominan determinísticos y estocásticos.

El proceso de ionización produce cambios en átomos y moléculas. En las células, algunos de los cambios iniciales pueden tener consecuencias a corto y a largo plazo. Si ocurre daño celular y éste no se repara correctamente, la célula puede ser incapaz de sobrevivir o de reproducirse. Del mismo modo puede no perder su capacidad reproductiva pero convertirse en una célula transformada. Estos resultados tienen consecuencias diferentes para el organismo en su conjunto.

La función de la mayoría de los órganos y tejidos del cuerpo humano no es afectada por la pérdida de pequeñas cantidades de células, y a veces ni siquiera por la pérdida de un número considerable de las mismas; pero si dicho número es lo suficientemente grande se producirá una lesión, que se manifiesta generalmente como una pérdida de función del tejido. La probabilidad de causar tal lesión es cero a dosis pequeñas de radiación, pero por encima de cierto nivel de dosis -denominado umbral- esta probabilidad aumenta abruptamente hasta llegar a la unidad. Por encima del umbral, la gravedad de la lesión también aumenta en relación con la dosis. Este tipo de efecto se llama determinístico, porque ocurre con seguridad si la dosis es suficientemente alta. Si la pérdida de células puede compensarse por repoblación, el efecto es relativamente leve.

El resultado es muy diferente si la célula irradiada -en vez de morir- sufre una transformación. En este caso pueden producir un "clon" de células hijas transformadas. El organismo humano tiene mecanismos de defensa muy eficaces, pero no es realista esperar que los mismos sean siempre totalmente efectivos. De esta manera, el clon de células producido por una célula somática modificada -pero capaz de reproducirse- puede causar, después de un período prolongado y variable, llamado período de latencia, una enfermedad maligna (un cáncer). Su probabilidad de ocurrencia -no la gravedad- aumenta con la dosis. Este tipo de efecto se llama estocástico, que significa de carácter aleatorio o estadístico. Si el daño se produce en una célula cuya función es transmitir información genética a generaciones posteriores, cualquier efecto, que podrá variar considerablemente en cuanto a tipo y gravedad, se expresará en la descendencia de la persona expuesta. Este tipo de efecto estocástico se denomina "hereditario".

Las medidas para la protección de la salud de las personas expuestas a la radiación ionizante surgieron como una necesidad, durante los años posteriores al descubrimiento de los rayos x, del fenómeno de la radiactividad y de la identificación y separación de los elementos radiactivos naturales. La aplicación con fines de diagnóstico médico y luego terapéutico de los rayos x y del radio 226 produjo, por descuido e ignorancia, lesiones (a veces mortales) tanto a los médicos como a los pacientes. El desarrollo de medidas de protección radiológica, tales como interponer materiales absorbentes de la radiación entre los equipos y el operador, reducir del tiempo

de exposición a la radiación, controlar la distancia de la fuente de radiación, fue una actividad constante en los países más desarrollados.

Como los efectos de la radiación se manifestaban como un enrojecimiento de la piel y si la exposición era mayor, como ampollas y heridas semejantes a las quemaduras por el fuego, desde un principio se consideró que existía un umbral para que se manifestaran los efectos nocivos de la radiación.

Durante la década de los años veinte en diversos países se constituyeron comités de expertos que estudiaron el problema y propusieron soluciones con el fin de atenuar los problemas de salud del personal expuesto a la radiación ionizante.

A su vez en el ámbito internacional, durante la realización del primer Congreso Internacional de Radiología, (Londres 1925) se creó la ahora denominada Comisión internacional de mediciones y unidades de radiación (ICRU según su nombre en inglés) y, en ocasión del segundo, (Estocolmo 1928) la ahora llamada Comisión internacional de protección radiológica. (ICRP sigla en inglés). Para ese entonces la primera comisión había definido una unidad para la "cantidad de rayos x" basada en la ionización del aire: El roentgen.

También durante los años veinte, distintos investigadores habían hecho recomendaciones respecto a la introducción de límites en la exposición de aquellas personas que trabajaban con radiaciones ionizantes. Se propició lo que se denominó la "dosis de tolerancia" la cual no debía ser mayor de una fracción de la dosis que producía eritema (el enrojecimiento) de la piel. En 1934 el Comité norteamericano que asesoraba en el tema fijó en 0,1 R por día la dosis de tolerancia. La ICRP reunida durante el Congreso Internacional de Radiología en Zurich, el mismo año, terminó fijando en 0,2 R por día la dosis de tolerancia. Entre esta primera recomendación a los usuarios de la radiación en medicina y la organización de la Comisión Internacional de Protección Radiológica tal como es en la actualidad transcurrieron una quincena de años, durante los cuales se produjo una revolución en el conocimiento de las propiedades de la materia.

El descubrimiento de la radiactividad artificial, de la fisión de los átomos del uranio, el posterior desarrollo de la bomba atómica, el bombardeo atómico de ciudades y los ensayos de los artefactos nucleares en la atmósfera, no solo por los Estados Unidos sino también por las nuevas potencias nucleares, la ex Unión Soviética, el Reino Unido y, años más tarde, Francia y China no solo pusieron a disposición de algunas naciones armas poderosísimas sino también crearon nuevas fuentes de radiación. Si bien en muchos casos, para la población general era la aparición de una fuente potencial de irradiación (los reactores de producción militar de material fisionable o más tarde las centrales nucleares de producción de energía eléctrica) el trabajar en la industria nuclear fue una profesión más.

El impacto de los trabajos realizados durante el Proyecto Manhattan (desarrollo de la bomba atómica) en la protección radiológica fue enorme y su efecto comenzó a sentirse inmediatamente después de la guerra. Se había desarrollado instrumentación para detectar y medir la radiación incluyendo equipos de vigilancia con cámaras de ionización portátiles que podían medir con exactitud tanto la emisión como la radiación dispersa de los equipos de rayos x como también monitorear los campos de radiación en la nueva industria nuclear. También se había llevado a cabo una enorme cantidad de trabajos de investigación en radiobiología conjuntamente con desarrollos en instrumentación y dosimetría personal.

Con el espíritu conservador que siempre había imperado dentro de la comunidad de expertos, en 1946 el comité norteamericano asesor en protección radiológica recomendó una dosis de 0,05 R por día, es decir 0,3 R por semana para los trabajadores. Una razón para la reducción del valor fijado en 1934 era la creciente evidencia de la posibilidad que la radiación ionizante pudiera causar efectos hereditarios.

El concepto de dosis de tolerancia dio lugar al de exposición o dosis máxima permisible, el cual no necesariamente implica un umbral. Este cambio fue introducido en una reunión de especialistas de Estados Unidos, Canadá y el Reino Unido llevada a cabo en Chalk River, Canadá en 1949. Esta fue basada en el concepto de que podía haber un cierto grado de riesgo a cualquier nivel de exposición a la radiación ionizante.

La ICRP, reorganizada en 1950 hizo suyos los valores estadounidenses pero recién en 1955 publicó como un suplemento de una revista científica británica sus recomendaciones estableciendo el término dosis permisible -la dosis de radiación ionizante a la cual se esperaba que no causase una lesión corporal a persona alguna en ningún momento de su vida.

Si bien durante el período 1950-1956 los EE. UU, la Unión Soviética y el Reino Unido hacían ensayos de armas nucleares efectuando explosiones en la atmósfera, fue la explosión del 1 de marzo de 1954, de un artefacto de fusión que liberó mayor cantidad de material radiactivo que en otras oportunidades y que pudo ser medido en diferentes partes del globo, lo que indujo a la Asamblea General de las Naciones Unidas a crear, en 1955, el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de Efectos de las Radiaciones Atómicas, conocido generalmente por las siglas de su nombre en inglés, UNSCEAR.

Fue en el primer informe de dicho Comité donde los expertos contratados por el mismo introdujeron por primera vez una desviación a la política determinista y por ende de la dosis umbral en la protección de los efectos de la radiación ionizante. Por medio de lo que se denominó dosis genéticamente significativa se comenzaron a considerar efectos aleatorios, tales como serían los hereditarios y la leucemia.

En forma casi paralela al Comité de las Naciones Unidas la ICRP aprobó el mismo año, 1958, el primer informe publicado por la editorial Pergamon

Press (aunque sin número podríamos llamarla Publicación N° 1 de la ICRP).

Dicha publicación establece que si se adopta una actitud conservadora debería considerarse que no existe umbral ni recuperación de los efectos de la radiación ionizante, en cuyo caso aun dosis bajas acumuladas podrían inducir leucemia en individuos susceptibles y la incidencia sería proporcional a la dosis acumulada. Con dicha publicación la ICRP abandonó el límite semanal y definió la dosis máxima permisible en el año, la que fue fijada en 5 rem. Para la dosis individual de los llamados por la ICRP "miembros del público", es decir para todo aquel no expuesto por razones de su trabajo a la radiación ionizante, fijó un valor igual a un décimo es decir 0,5 rem.

En Argentina la utilización de la radiación ionizante en la medicina tanto para el diagnóstico como para el tratamiento fue considerada como una actividad insalubre y por ende los que la ejercían gozaron de un tratamiento laboral especial: jornada de trabajo reducida y períodos de vacaciones prolongados.

No fue ese el caso en la entonces Dirección de Energía Atómica ni en su continuadora la Comisión Nacional de Energía Atómica, donde desde un principio, se pusieron en práctica las medidas necesarias para la protección del personal de los efectos nocivos de la radiación ionizante, adoptando las recomendaciones internacionales.

Las Normas básicas de seguridad radiológica puestas en vigencia en 1966 definen como límites máximos permisibles en condiciones normales de trabajo: 5 rem/año para la irradiación externa uniforme en todo el cuerpo, o en particular de gónadas y órganos hematopoyéticos; 30 rem/año para la irradiación externa de piel, tiroides y huesos; 75 rem/año en la irradiación de manos, antebrazo, pies y tobillos; y 15 rem/año para la irradiación de cualquier otro órgano.

El sistema de limitación de dosis recomendado por la ICRP en el año 1977 en su Publicación N° 26 condujo a un profundo cambio de mentalidad en protección radiológica, al mismo tiempo que aumentó significativamente el grado de pretensión en términos de seguridad radiológica aplicado hasta ese momento. Limitar la dosis de las personas más expuestas dejó de ser el objetivo fundamental de la protección para transformarse en una condición necesaria pero no suficiente a cumplir. En efecto, evitar cualquier dosis innecesaria por pequeña que fuere -justificación- y mantener las dosis tan bajas como sea razonable teniendo en cuenta aspectos económicos y sociales -optimización-, son dos conceptos trascendentes enfatizados en el sistema de limitación de dosis aludido, y que fueron incorporados a las normas regulatorias argentinas a fines de la década del '70.

Rápidamente se observó que las dosis máximas resultantes de la operación de instalaciones diseñadas con estos criterios resultaban ser -en la

mayoría de los casos prácticos y en virtud del principio de optimización-significativamente inferiores a los valores fijados en los límites de dosis. La introducción del criterio de optimización en el diseño de las nuevas instalaciones hizo que las dosis recibidas por los trabajadores y el público disminuyeran por un factor 10 o más, en la mayoría de los casos.

A partir del año 1991, la ICRP formuló nuevas recomendaciones (Publicación N° 60) sobre protección radiológica que si bien mantienen los criterios básicos contenidos en el sistema de limitación de dosis presentado en 1977, recomiendan una reducción significativa de los límites de dosis, la aplicación de restricciones de dosis, el análisis de las exposiciones potenciales y la aplicación de niveles de intervención para emergencias, que tienen implicancias directas en el diseño y operación de las instalaciones nucleares.

Las nuevas recomendaciones de la ICRP marcan una evolución en el conocimiento de los efectos de la radiación, a bajas dosis y bajas tasas de dosis, como consecuencia de un mejor conocimiento de la dosimetría relacionada con los bombardeos atómicos a Hiroshima y Nagasaki, de un incremento importante en la cantidad de datos epidemiológicos disponibles en los últimos años y de los progresos obtenidos en la interpretación de los mecanismos de la oncogénesis.

Esta evolución del conocimiento en la última década llevó a la ICRP a reconocer un riesgo asociado con la radiación superior a la que consideró en sus recomendaciones de 1977, contenidas en su publicación N° 26. De esta forma, el valor de la probabilidad, de muerte por radiación, de $1,2 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ estimado en aquel año, es reemplazado, en las nuevas recomendaciones, por $4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ para trabajadores y $5 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ para el público en general.

Además, las nuevas recomendaciones incorporan el concepto multiatributo del detrimento mediante el cual se puede comparar el impacto producido por la radiación, en distintas situaciones.

El incremento en la probabilidad de inducción de cáncer y el cambio conceptual del detrimento y su forma de evaluarlo, hizo que la ICRP recomiende una reducción de los límites de dosis ocupacionales, tratando de mantener un grado de ambición en seguridad, similar al estipulado en el año 1977. El actual límite de dosis, de 50 mSv en un año, fue reducido a 20 mSv como promedio en 5 años, permitiéndose cierta flexibilidad de un año a otro siempre que en un único año, no se exceda 50 mSv.

El límite de dosis para el público, 1 mSv en un año, promediado durante toda la vida, se mantuvo en las nuevas recomendaciones, aunque actualmente el promedio debe efectuarse cada 5 años. Además se recomienda el uso de restricciones de dosis para una fuente de radiación en particular, con todo lo cual la ICRP estima que la protección del público se incrementará.

En nuestro país, la Norma Básica en Seguridad Radiológica - AR 10.1.1. aprobada el 22 de mayo de 1995 y publicada en Boletín Oficial N° 28.160 ha incorporado las recomendaciones citadas en los párrafos precedentes.