

|                       |             |
|-----------------------|-------------|
| C.N.E.A. Biblioteca   |             |
| ARCHIVO PUBLICACIONES |             |
| Nº<br>3               | AÑO<br>1987 |

# Aspectos Regulatorios de Seguridad Radiológica en la Práctica Médica

P.M. Sajaroff; C.F. Arias

## 1. Introducción

En base al conocimiento actual, los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes pueden ser clasificados en "estocásticos" y "no estocásticos". Los efectos estocásticos se caracterizan por el hecho de que la probabilidad de su ocurrencia, y no su gravedad, es una función de la dosis; en los efectos no estocásticos, la gravedad depende de la dosis y existe una dosis umbral por debajo de la cual estos efectos no se manifiestan.

Todos los efectos hereditarios radioinducidos son estocásticos y el principal efecto somático estocástico es la carcinogénesis; como ejemplos de efectos somáticos no estocásticos pueden mencionarse los efectos agudos y las cataratas del cristalino.

Respecto de los efectos estocásticos, si se analiza un caso individual de inducción de cáncer no resulta posible establecer su relación con la exposición a la radiación, por lo que la información que se dispone sobre carcinogénesis humana debida a radiación se infiere de evaluaciones estadísticas de poblaciones irradiadas. La probabilidad de radioinducción de enfermedades ma-

lignas está bien definida para dosis elevadas, del orden de 1 Gy (100 rad) o aún mayores, pero la evidencia estadística para la mayoría de las enfermedades malignas sigue siendo insuficiente. Para dosis bajas no se sabe si existe un umbral de dosis.

Para los fines de la protección radiológica, se supone una función lineal de la dosis vs la probabilidad de ocurrencia de un efecto estocástico, dentro del rango de dosis habituales en el trabajo con radiaciones. Una consecuencia de esta suposición es que las dosis resultan aditivas, en el sentido de que iguales incrementos de dosis aumentan igualmente la probabilidad de un efecto, en un valor que es independiente de las dosis acumuladas previamente. Se supone además que la pendiente adecuada para esta función lineal es la de una recta trazada desde los puntos observados a dosis altas y que pasa por el origen; el hecho de hacer pasar esta recta por el origen implica suponer que no existe una dosis umbral, lo que constituye un criterio conservador ante la ya aludida falta de información en el rango de dosis bajas.

## **2. Objetivos de la protección radiológica**

Para individuos expuestos a la radiación, los objetivos de la protección radiológica son la prevención de la ocurrencia de efectos no estocásticos y la limitación del riesgo de efectos estocásticos a niveles aceptables. Aún si cada individuo está adecuadamente protegido, el riesgo a que se encuentra expuesto no es nulo si la dosis de radiación recibida no lo es. La probabilidad de que se manifieste un efecto estocástico en un conjunto de individuos expuestos a radiación constituye un detrimento y aumenta con el número de personas expuestas y con las dosis recibidas por cada una de ellas o sea, aumenta con la dosis colectiva. El detrimento total debido a una dada práctica que involucre la expo-

sición de un cierto número de individuos debe también ser limitado, a fin de asegurar que dicha práctica se justifica por los beneficios netos que se obtengan.

Para lograr estos objetivos, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) recomienda el uso de un sistema de limitación de dosis que se basa en los siguientes requisitos:

**1) Justificación:** No debería autorizarse ninguna práctica que implique, o pueda implicar, exposición del ser humano a las radiaciones ionizantes, salvo que se demuestre que su introducción origina beneficios y que es la opción más favorable frente a otras prácticas que no impliquen exposición a las radiaciones ionizantes.

**2) Limitación de la dosis individual:** Las dosis equivalentes individuales originadas por todas las prácticas (excepto aquellas específicamente excluidas) deben ser menores que los límites de dosis correspondientes. Debe tenerse en cuenta que ciertas prácticas actuales producirán dosis equivalentes en el futuro debido a fenómenos físicos, biológicos y ecológicos; esto debe también ser considerado para asegurar que las prácticas presentes o futuras no lleguen a producir una exposición combinada excesiva para algún individuo. Cabe mencionar que los límites de dosis no tienen en cuenta las dosis debidas a la radiación natural ni las recibidas por los pacientes con fines médicos (radiodiagnóstico y radioterapia).

**3) Optimización:** Todas las exposiciones deben mantenerse por debajo de los límites de dosis y tan bajas como sea razonablemente alcanzable, teniendo en cuenta las consideraciones socio-económicas aplicables. Este requisito implica que el detrimento originado por una práctica debería reducirse, mediante medidas de protección, a un valor tal que las reducciones posteriores resulten menos significativas que los recursos adicio-

nales necesarios para obtenerlas. Habitualmente, este criterio se lleva a la práctica mediante análisis costo-beneficio.

### **3. Límites de dosis para exposiciones ocupacionales**

Para prevenir la ocurrencia de efectos no estocásticos la ICRP recomienda un límite de 0,5 Sv (50 rem) en un año para todos los tejidos, excepto el cristalino del ojo, para el cual el límite anual recomendado es 0,15 Sv (15 rem). Estos valores se aplican independientemente de que los tejidos sean expuestos solos o en combinación con otros tejidos, y su propósito es limitar las exposiciones que además deben cumplir con la limitación para efectos estocásticos. Para la limitación de estos últimos, la magnitud física que se controla es la dosis equivalente efectiva,  $H_E$ , siendo su límite anual 50 mSv (5 rem).

En este tema resulta de interés comparar los riesgos asociados a los límites de dosis con los riesgos debidos a las ocupaciones convencionales. Al respecto es importante destacar que en éstas, el riesgo suele expresarse como el riesgo promedio para todos los trabajadores en dichas ocupaciones, si bien existe una variación del riesgo individual con el trabajo específico.

En el trabajo con radiaciones existe también una distribución de riesgos individuales. En muchos casos de exposición ocupacional con una adecuada protección radiológica, la dosis equivalente efectiva anual promedio es aproximadamente la décima parte del límite, con lo cual el detrimento por radiación es del mismo orden de magnitud que el de las industrias convencionales conocidas como seguras (en las cuales, pese a su denominación, el índice de riesgo asociado no es nulo).

Los límites de dosis tienen como objetivo asegurar una protección adecuada aún para los individuos más expuestos. Las exposiciones individuales cercanas a los límites pueden asimilarse a una situación convencional en la que para algunos trabajadores se tiene un riesgo mayor que el promedio. Si las exposiciones se mantuvieran repetidamente cercanas a los límites para un grupo importante de trabajadores, la situación sería aceptable sólo si un análisis costo-beneficio demostrara que el riesgo resultante es justificable, y siempre que ello fuera también el resultado de la optimización de la protección.

#### **4. Aplicación a la práctica médica**

##### **4.1. Protección de los trabajadores**

Desde el punto de vista ocupacional, la preocupación por la salud de los trabajadores ha originado el desarrollo de dos criterios conceptualmente distintos. Uno de ellos consiste en otorgar a los trabajadores una compensación como resarcimiento por el posible daño ocasionado a su salud. La aplicación de este criterio ha dado como resultado que no se realicen esfuerzos por mejorar las condiciones de trabajo y está siendo abandonado gradualmente en los países que se preocupan por la salud de los trabajadores. Especialmente en las prácticas con radiaciones, este concepto fue superado hace ya más de veinte años.

El segundo criterio, en cambio, establece límites de riesgo individual e impone la obligatoriedad de adecuar las instalaciones, los equipos y los procedimientos de trabajo para no superar esos límites. En la actividad nuclear, además de garantizar un riesgo individual bajo, se pretende minimizar el impacto radiológico colectivo. Esto implica diseñar las instalaciones de manera que la dosis equivalente colectiva resultante en los

trabajadores se mantenga tan baja como sea razonable y que, en todos los casos, las dosis individuales estén por debajo de los límites citados. Este concepto implica tener en cuenta, no sólo las dosis recibidas sino, también, el número de personas involucradas.

En la actualidad existe consenso internacional respecto a que no se deberían sustituir las reales medidas de protección por prerrogativas o compensaciones especiales para los trabajadores. Incluso las Normas Básicas de Protección Radiológica del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y de la Organización Internacional del Trabajo (OIT), basadas en las recomendaciones de la ICRP, establecen que los requerimientos de protección no deberán ser sustituidos por privilegios o compensaciones para los trabajadores.

En consecuencia, para garantizar un riesgo individual reducido y para minimizar el impacto radiológico colectivo deben mantenerse bajo control las dosis de radiación y las personas expuestas. La reducción de los tiempos de exposición no asegura de modo alguno que se cumplan estos objetivos. En efecto, las instalaciones productoras de radiaciones ionizantes pueden provocar dosis inaceptables en tiempos muy breves. Por otra parte, la reducción del horario de labor de cada trabajador implica incrementar el número de personas expuestas, lo cual puede resultar, a su vez, en un aumento de las dosis improductivas y consecuentemente, en un mayor impacto radiológico colectivo.

Debe tenerse en cuenta que la reducción de la jornada laboral y la duplicación de las licencias anuales, manteniendo las remuneraciones correspondientes a jornadas completas de trabajo, implican un costo que no asegura ningún beneficio real en la salud del trabajador. Ese esfuerzo económico produciría beneficios realmente satisfactorios en la protección si se lo destina-

ra a atender los gastos de adecuación de instalaciones que requieran mejoras en materia de radioprotección y a aumentar la capacidad fiscalizadora de los organismos que tienen la responsabilidad de supervisar tales instalaciones.

Los límites de dosis representan las condiciones más desfavorables que pueden llegar a aceptarse en situaciones particulares, pero el hecho de que las dosis resulten inferiores a dichos límites no implica necesariamente contar con condiciones aceptables de protección.

No debe dejar de considerarse que cualquier dosis de radiación, por pequeña que sea, involucra un cierto riesgo, por lo que es necesario reducirla tanto como sea razonable; lograr ello significa optimizar la protección radiológica. En la práctica, esto puede obtenerse con un diseño adecuado de las instalaciones y con una apropiada práctica operativa. Ejemplos de la aplicación de estos principios son el comando a distancia, blindajes adecuados (tal el caso de los recintos de irradiación), el buen funcionamiento de los equipos y sus accesorios (pantallas fluoroscópicas, sistemas de colimación del haz, etc) y el uso de elementos de protección personal (delantales plomados, etc). De esta manera se logra una reducción de las dosis con un costo, en general, poco significativo frente al de los equipos en sí. Por otra parte, se deben dejar de emplear ciertos procedimientos operativos inadecuados, tales como sostener niños en exámenes radiológicos (lo que, en ciertas condiciones, debe ser efectuado generalmente por quien acompaña al niño).

#### **4.2. Protección de los pacientes**

En lo que hace a los pacientes, el principio de optimización debe aplicarse tanto en radiodiagnóstico como en radioterapia.

Una vez que se ha decidido efectuar un procedimiento de diagnóstico, optimizar la protección significa obtener, mediante una imagen radiológica, la información necesaria con el mínimo de dosis en el paciente. Entre los factores que contribuyen a lograr este objetivo pueden mencionarse la adecuada colimación del haz, una correcta distancia entre la fuente radiante y el paciente, la composición energética del haz de radiación y una apropiada sensibilidad de las placas y pantallas fluoroscópicas. Regulando estos factores, las dosis en los pacientes pueden reducirse sensiblemente y por otra parte se logra, en general, una mejor calidad de la imagen radiológica.

Otro aspecto a tener en cuenta en lo referente a la protección del paciente es la importancia del momento en que se realiza el examen cuando se trata de mujeres. Es importante considerar, de ser el caso, la posibilidad de un embarazo, ya que los mayores riesgos en el desarrollo embrionario se producen entre la octava y la decimoctava semana de gestación.

Por otra parte, el concepto de justificación no siempre es aplicado y muchos procedimientos radiológicos se llevan a cabo sin un análisis previo apropiado. Si bien el uso de radiaciones con propósito médico es, en principio, justificable, se debería evaluar periódicamente el valor epidemiológico de los exámenes radiológicos obligatorios derivados de formalidades legales o administrativas.

En el caso de aplicaciones terapéuticas, la optimización implica lograr, de la manera más precisa posible, la dosis necesaria en el volumen de tejido que se quiere irradiar, preservando al máximo el resto de los tejidos. Esto requiere mantener calibrados los equipos de terapia y realizar en cada caso una adecuada planificación del tratamiento.

## 5. Autoridades competentes y legislación vigente

Según la reglamentación vigente (Decreto N° 842/58, Ley N° 17.557/67, Decreto 6320/68), la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) es la Autoridad nacional competente (en adelante, la Autoridad) en el uso y aplicación de materiales radiactivos, materiales nucleares y radiaciones ionizantes, excepto equipos generadores de rayos X. De esta manera ninguna persona puede elaborar, producir, recibir, adquirir, proveer o utilizar en ninguna forma tales materiales y fuentes de radiación si no ha sido previa y debidamente autorizada por la Autoridad (incluyendo las personas que actúan por orden y cuenta de la CNEA en instalaciones que pertenecen a ésta y las que trabajan bajo contrato con la misma). En el uso y aplicación de equipos generadores de rayos X, la Autoridad nacional competente es la Secretaría de Salud Pública, dependiente del Ministerio de Salud y Acción Social.

El empleo de radioisótopos y radiaciones ionizantes (excepto rayos X) en medicina cubre diversas aplicaciones en diagnóstico, terapia e investigación:

- Uso de trazadores radiactivos para estudios dinámicos y cinéticos.
- Uso de soluciones radiactivas en terapia (tratamiento del hipertiroidismo y disfuncionamiento cardíaco, tratamiento del carcinoma de tiroides, tratamiento de hemopatías y metástasis óseas, uso de radiocoloides en aplicaciones intracavitarias, uso de fuentes selladas y corpusculares en aplicaciones intersticiales, superficiales e intracavitarias).
- Uso de equipos de telegammaterapia.
- Uso de aplicadores de radiación beta para tratamiento de lesiones superficiales de piel u oculares.

- Uso de aceleradores lineales, betatrones o generadores de radiación de alta energía.
- Usos experimentales o no comunes en seres humanos.
- Uso de trazadores radiactivos "in-vitro".

Estas aplicaciones médicas están reglamentadas por una norma (Resolución N° 1790/76 de la CNEA), por la cual los médicos y entidades asistenciales que soliciten a la Autoridad autorización para utilizar radioisótopos y fuentes de radiaciones ionizantes en investigación, diagnóstico y terapéutica médica deben cumplir previamente ciertos requisitos en cuanto a instalaciones, equipamiento y calificación del personal.

Por un lado, las entidades médicas (hospitales, policlínicos, institutos, centros de investigación, sanatorios, clínicas, consultorios particulares, cátedras universitarias) deben contar con instalaciones y equipos adecuados para el uso propuesto según lo especificado en cada caso.

Por otra parte, cada entidad médica usuaria de un determinado radioisótopo o un dado tipo de fuente de radiación debe contar en su plantel con, por lo menos, un médico autorizado individualmente para el uso de que se trate. En el caso de que una entidad médica cuente con un único médico en estas condiciones, éste será el responsable directo por la tenencia y uso del material radiactivo o fuente de radiación a todos los efectos legales. Si la entidad cuenta con más de un médico autorizado, la Dirección de la misma deberá designar entre ellos al responsable y éste aceptar formalmente tal función, la cual subsistirá hasta tanto dicho profesional no renuncie por escrito a ella, independientemente de su eventual retiro de la entidad.

Sólo en caso de fallecimiento del responsable, la responsabilidad recae en la máxima autoridad de la en-

tividad, en la medida en que ésta no informe del hecho a la Autoridad dentro de los cinco días hábiles subsiguientes. Tal evento determina la suspensión automática de las autorizaciones vigentes de la entidad, hasta tanto se designe como responsable a otro profesional autorizado y éste acepte por escrito tal designación.

Es importante destacar que el concepto de "responsable" no es una mera formalidad administrativa. Para la Autoridad, la persona que cubre esa función es el responsable primario del cumplimiento de todas las condiciones de protección radiológica contenidas en la autorización de funcionamiento. Por otra parte, si bien la responsabilidad primaria es del responsable, la Dirección de la entidad debe prestarle todo el apoyo que necesite y realizar una supervisión adecuada para garantizar que esa instalación se opera en condiciones seguras. Ello implica que deben hacer todo lo que sea razonable y compatible con sus posibilidades en favor de la seguridad de la instalación, cumpliendo como mínimo las normas aplicables dictadas por la Autoridad, las condiciones de la autorización de funcionamiento y los requerimientos que formule la Autoridad; el solo cumplimiento de estas normas, condiciones y requerimientos no exime de la responsabilidad por la seguridad radiológica de la instalación al responsable y a la Dirección de la entidad. Además, es necesario tener en cuenta que el cumplimiento de los diversos requerimientos de la Autoridad competente en materia de seguridad radiológica no exime al responsable y a la Dirección de la entidad de cumplir los requerimientos de otras Autoridades competentes no relacionadas con la seguridad radiológica.

Toda persona que desee emplear radioisótopos y fuentes de radiación en seres humanos debe ser médico matriculado en el país y contar con una adecuada capacitación teórica en el empleo de radiaciones ionizantes y una apropiada formación clínica activa en la aplicación de los mismos.

La capacitación teórica implica conocimientos de principios de física nuclear, radiactividad, interacción de la radiación con la materia, radiodosimetría, efectos biológicos, medición de la radiactividad, cálculo y medición de las dosis administradas, gestión de residuos radiactivos, etc,. Para ello se dictan cursos tales como los de "Metodología y Aplicación de Radioisótopos" y "Dosimetría en Radioterapia", los cuales, según correspondan al uso propuesto, deben ser aprobados por el solicitante de autorización individual.

La formación clínica activa consiste, como mínimo, en lo siguiente:

- Examen de pacientes para determinar la conveniencia de emplear radioisótopos en diagnóstico y tratamiento.
- Determinación de los radionucleidos a ser administrados y de las dosis necesarias.
- Seguimiento de la evolución de los pacientes durante el tratamiento y post-tratamiento, eficacia del método utilizado, etc.

Esta formación debe ser formalmente acreditada por un preceptor aceptado por la Autoridad (médico autorizado que se desempeñe como responsable).

Finalmente, en función del análisis de los antecedentes presentados por las entidades y personas peticionantes de autorización para un dado uso, la Autoridad se expide concediendo, o no, las autorizaciones en cuestión.

Cabe mencionar que si se otorga la autorización solicitada, ésta permite a su tenedor poseer y emplear materiales radiactivos y fuentes de radiación de acuerdo con las condiciones establecidas en la misma y de

acuerdo a las reglamentaciones vigentes. El empleo de los mismos debe ser efectuado por el o los médicos autorizados individualmente que figuren en la solicitud de la autorización a entidades, o bajo su directa supervisión y responsabilidad, en forma restringida al lugar y aplicaciones mencionadas en dicha solicitud. Otros médicos, cuyos nombres no figuren, pueden participar en los programas de trabajo para que puedan adquirir experiencia y formación clínica mínimas necesarias para solicitar a su vez autorización individual.

Como complemento de la Resolución CNEA N° 1790/76, en el año 1980 entró en vigencia una norma relativa a la operación de "unidades de medicina nuclear y de terapia radiante" reglamentada mediante Resolución conjunta de la CNEA y la Secretaría de Salud Pública. Por unidad de medicina nuclear se entiende a la entidad médica que dispone de la infraestructura necesaria para las diversas aplicaciones de los radioisótopos al diagnóstico "in-vivo" e "in-vitro", mediante el uso de trazadores radiactivos (soluciones, moléculas marcadas, suspensiones, etc) y a la terapéutica con dichos trazadores. Extendiendo este concepto, por "servicio de medicina nuclear" se define a la unidad que por su infraestructura puede cubrir los aspectos asistenciales y ocasionalmente, entrenamiento y capacitación docente; por "centro de medicina nuclear" se entiende a la unidad que por su complejidad cubre funciones asistenciales, docentes y de investigación. La presente norma reglamenta para cada uno de estos casos las instalaciones, equipamiento y dotación de personal necesario, incluyendo la calificación y el entrenamiento del mismo en temas de medicina nuclear. A título de ejemplo se detalla a continuación lo requerido para un "centro de medicina nuclear":

- La dotación mínima del personal debe estar integrada por dos profesionales médicos, por los menos uno de ellos autorizado para el uso de material

radiactivo en seres humanos por turno de operación; un profesional químico, bioquímico o farmacéutico autorizado en técnicas radiosiotópicas y un técnico que acredite conocimientos suficientes para colaborar con los profesionales en el manejo de equipos y uso de material radiactivo por turno de operación.

- Las instalaciones deben contar, como mínimo, con un ambiente por equipo de medición "in-vivo", un laboratorio de radiofarmacia o de pruebas "in-vitro", un cuarto para depósito activo, un cuarto para descontaminación, instalaciones para archivos de datos, un cuarto oscuro para procesamiento de películas fotosensibles y un lugar adecuado para desarrollar actividad docente.
- El equipamiento mínimo debe estar constituido por un detector de radiaciones para mediciones "in-vivo", un equipo detector tipo pozo, una cámara gamma con computadora asociada, un monitor portátil y un calibrador de actividades.

Por unidad de terapia radiante se entiende a la entidad clínica destinada al tratamiento de pacientes por acción de radiaciones ionizantes y que puede, además, cumplir tareas docentes; en esta definición no se consideran las entidades clínicas que utilicen, como accesorio de su especialidad médica, equipos o instrumentos que emitan radiación ionizante para uso en dermatología, oftalmología y neurocirugía. Las unidades de terapia radiante pueden, por lo tanto, hacer uso de sistemas de teleterapia (equipos de telegammaterapia, aceleradores de partículas, aplicadores intracavitarios de retrocarga, fuentes para braquiterapia) y de radioterapia (convencional, superficial, simuladores de tratamiento, aceleradores lineales para producción de rayos X, etc).

Esta norma reglamenta las instalaciones, equipamiento y dotación del personal (incluyendo la calificación y entrenamiento del mismo).

En cuanto al personal se requiere lo siguiente:

- Médicos autorizados para el uso de equipos de radioterapia que hayan obtenido las licencias que correspondan según lo previsto en el Decreto No. 842/58 y en la Ley 17557; el número de estos médicos debe ser suficiente para cubrir todo el horario de atención de la unidad, considerando licencias y vacaciones.
- Un profesional "especialista en física de la radioterapia" reconocido como tal, el cual debe cumplir un horario mínimo de 4 horas diarias en la unidad; cuando el número de pacientes nuevos por año supera los 1000, debe ser secundado por otro especialista o por un "técnico en física de la radioterapia". Para unidades de terapia radiante donde se atiendan menos de 200 pacientes nuevos por año, este requisito puede satisfacerse con la asistencia permanente de un técnico en física de la radioterapia supervisado por un especialista que en esa unidad cumpla sus tareas durante no menos de 8 horas semanales. En unidades que operan aceleradores o betatrones, durante todo el horario de atención debe estar presente un especialista o un técnico; en estas unidades, la presencia mínima del especialista debe ser de 6 horas diarias, si el horario de atención de pacientes es mayor de 6 horas por día.
- La operación de equipos de radioterapia puede ser efectuada solamente por médicos, personal de física de radioterapia y, tal como sucede normalmente, por técnicos en radioterapia, entrenados a tal efecto en cursos reconocidos.

Cabe mencionar que esta norma no contempla al personal de enfermería o auxiliar.

En cuanto al equipamiento mínimo necesario para que una instalación sea reconocida como unidad de terapia radiante, la norma requiere lo siguiente:

- Un equipo de "alta energía", ya sea uno de telecobaltoterapia o un acelerador lineal, que cumpla ciertas especificaciones (en los equipos de telecobaltoterapia, actividad de la fuente radiactiva y distancia fuente-piel; en los aceleradores lineales para producción de rayos X, energía pico del espectro no menor que 4 MeV y sistema isocéntrico).
- Un equipo de radioterapia convencional con un rango de energía intermedio entre el de alta energía y el de terapia superficial.
- Un equipo de radioterapia superficial.
- Un simulador de tratamientos o un equipo de radiodiagnóstico.
- Aplicadores intracavitarios de retrocarga y fuentes radiactivas para braquiterapia.
- Instrumental para calibración dosimétrica de los equipos de tratamiento y de las fuentes radiactivas.
- Elementos auxiliares para el tratamiento y su planificación.

## CONCEPTOS BASICOS

### 1. Detrimento

Este concepto permite identificar -y en lo posible cuantificar- los efectos deletéreos de la exposición a las radiaciones ionizantes sobre la salud. En general, el detrimento en una población se define como la probabilidad del daño ocasionado por la exposición a la radiación, teniendo en cuenta no sólo la probabilidad de cada efecto deletéreo sino también la gravedad del mismo.

Para los efectos sobre la salud, si la probabilidad  $p_i$  de sufrir el efecto  $i$  es pequeña y si la gravedad del efecto se expresa por el factor de ponderación  $g_i$ , el detrimento de la salud  $G$  en un grupo de personas  $P$  resulta:

$$G = P \sum_i p_i g_i$$

Esta definición del detrimento presupone diversos efectos posibles en cada persona expuesta. Una manera más sencilla es tener en cuenta un único efecto (p.e. muerte por carcinogénesis, con lo cual  $g = 1$ ) y considerar un grupo  $N_i$  de personas expuestas a aproximadamente las mismas dosis (con lo cual la probabilidad es prácticamente la misma), por lo que el detrimento resulta:

$$G = N_i P_i$$

En estas condiciones, para un conjunto de diversos grupos expuestos a distintas dosis, el detrimento es:

$$G = \sum N_i P_i$$

## Dosis equivalente

La dosis absorbida  $D$  no es suficiente para predecir la probabilidad o la gravedad de los efectos deletéreos sobre la salud debidos a exposición en condiciones no especificadas.

En protección radiológica se introdujo, por lo tanto, otra magnitud para establecer una mejor relación entre la exposición a la radiación y los efectos deletéreos, en especial los estocásticos tardíos.

Esta magnitud se denomina dosis equivalente  $H$  en un punto del tejido y se la define por medio de la siguiente expresión:

$$H = D Q N$$

donde  $Q$  es el factor de calidad y  $N$  es el producto de todos los otros factores modificantes (los cuales pueden tener en cuenta, por ejemplo, la tasa de dosis absorbida y su fraccionamiento; actualmente se asigna a  $N$  el valor 1).

La unidad de la dosis equivalente es el sievert (Sv)

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 100 \text{ rem}$$

El factor de calidad se introduce para tener en cuenta el efecto de la distribución microscópica de la energía absorbida sobre el detrimento, con lo cual se tiene una relación  $Q = f(L)$ , donde  $L$  es el poder de frenado de colisión en agua en el punto de interés. Ciertos valores son los siguientes:

| $L_{\infty}$ en agua<br>(keV/ ) | Q  |
|---------------------------------|----|
| 3,5                             | 1  |
| 7                               | 2  |
| 23                              | 5  |
| 53                              | 10 |
| 175                             | 20 |

Para un espectro de radiación se puede calcular un valor efectivo  $\bar{Q}$  en el punto de interés.

Cuando no se conoce la distribución en todos los puntos del volumen de interés, se pueden emplear valores aproximados de  $\bar{Q}$  según el tipo de radiación primaria. Los valores recomendados para  $\bar{Q}$  por la CIPR son los siguientes:

- Rayos X, rayos  $\gamma$  y electrones 1
- Protones y partículas con una única carga y masa en reposo superior a una unidad de masa atómica de energía desconocida. 10
- Neutrones y partículas con cargas múltiples y partículas de carga desconocida, con energía desconocida. 20

Para neutrones térmicos,  $\bar{Q} = 2,3$ .

Los valores de  $Q$  y  $\bar{Q}$  se emplean en protección radiológica para comparar los niveles de exposición con los límites de dosis equivalente, o para evaluar las componentes del detrimento que se consideran al establecer dichos límites.

### 3. Dosis equivalente efectiva

La dosis equivalente efectiva  $H_E$  se define de la siguiente manera:

$$H_E = \sum_T W_T H_T$$

donde  $H_T$  es la dosis equivalente en el tejido  $T$  y  $W_T$  es un factor de peso que representa la proporción del detrimento por efectos estocásticos en el tejido  $T$  respecto del detrimento total por efectos estocásticos cuando todo el cuerpo es irradiado uniformemente.

Los valores de  $W_T$  recomendados por la ICRP son los siguientes:

| TEJIDO           | $W_T$ |
|------------------|-------|
| Gonadas          | 0,25  |
| Médula ósea roja | 0,12  |
| Pulmón           | 0,12  |

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| Tiroides                    | 0,03 |
| Superficies óseas           | 0,03 |
| Mama                        | 0,15 |
| Organos o tejidos restantes | 0,30 |

A cada uno de los cinco órganos o tejidos restantes del cuerpo humano que reciban las dosis equivalentes más elevadas se le aplica un valor de  $W_T = 0,06$ , pudiendo desprejarse la exposición de los demás tejidos. El estómago, intestino delgado, intestino grueso superior e intestino grueso inferior se consideran como cuatro órganos diferentes.

#### 4. Dosis equivalente colectiva

La dosis equivalente colectiva  $S$  en una población se define de la siguiente manera:

$$S = \sum_i H_i P_i$$

donde  $H_i$  es la dosis equivalente per caput en el cuerpo entero o en algún órgano o tejido específico de los individuos  $P_i$  del subgrupo  $i$  de la población expuesta.

\* \* \* \* \*