

El análisis de costes-beneficios y la protección radiológica*

por J.U. Ahmed y H.T. Daw

El análisis de costes-beneficios es un medio de determinar la mejor manera de asignar recursos. La Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones (CIPR) recomienda, en su publicación N° 26, este método para justificar las prácticas de radioexposición y para reducir las exposiciones al valor más bajo que pueda razonablemente alcanzarse, teniendo en cuenta los debidos factores económicos y sociales.

1. PRINCIPIOS BÁSICOS

El empleo de un determinado procedimiento (industrial o de otro tipo) que entrañe exposición a las radiaciones puede justificarse mediante el examen de los costes y beneficios que comporta. El objetivo de tal análisis es asegurar que se produce un beneficio neto. Esto puede expresarse mediante la ecuación:

$$B = V - (P + X + Y)$$

donde B es el beneficio neto, y V el beneficio bruto, P el coste básico de producción (excluido el de protección), X el coste de conseguir el nivel necesario de protección, e Y es el coste del detrimento de la salud que pueda causar el procedimiento.

Un valor negativo de B significa que el proceso de que se trate está justificado; por el contrario, su justificación se hace cada vez más evidente al aumentar el valor positivo de B. Sin embargo, algunos de los beneficios y detrimentos son imponderables o subjetivos y, por consiguiente, difícilmente cuantificables. Si bien los costes P y X se expresan fácilmente en términos monetarios, V puede contener componentes difíciles de cuantificar. La cuantificación de Y es la más problemática y, probablemente, la cuestión más controvertida.

Así, en el análisis de costes-beneficios es necesario introducir juicios de valor. Estos juicios deben reflejar los intereses de la sociedad y, por tanto, requieren la participación de órganos gubernamentales y autoridades competentes y el conocimiento de las opiniones de diversos sectores del público.

Una vez que un procedimiento se justifique mediante un análisis de costes-beneficios, la radioexposición de los individuos y poblaciones resultante de dicho procedimiento deberá reducirse al valor más bajo que pueda razonablemente alcanzarse teniendo en cuenta los factores económicos y sociales pertinentes (esto significa la aplicación del llamado principio ALARA).

* Artículo basado en un informe sobre el mismo tema (en preparación por un Grupo asesor del Organismo Internacional de Energía Atómica).

Para justificar la introducción de un nuevo procedimiento o modificar uno ya existente hay que tener en cuenta otras muchas consideraciones además de las de protección radiológica. La consideración relativa a la radiación en el proceso de análisis de costes-beneficios se limita exclusivamente al coste de la protección radiológica y al de los daños para la salud resultantes de la radioexposición de individuos y poblaciones.

El análisis de costes-beneficios contribuye a asegurar que el beneficio total es mayor que los inconvenientes totales propios de un determinado procedimiento. Esos inconvenientes totales incluyen todos los costes y todos los aspectos negativos del procedimiento propuesto, por ejemplo: gastos de capital y de explotación, coste de la protección radiológica, valor de los daños para la salud resultantes de la exposición de individuos y del público a las radiaciones y a otros riesgos, utilización de la tierra, etc. El beneficio total comprende el valor del producto, el aumento del empleo, el incremento de energía disponible, la elevación del nivel de vida, etc.

2. ELEMENTOS CONSIDERADOS EN LA JUSTIFICACION

Desde el punto de vista de la protección radiológica no basta para justificar un procedimiento demostrar que produce un beneficio neto. Aunque el análisis pueda conducir a tal resultado, hay casos en que los riesgos de exposición a las radiaciones para algunos individuos serán excesivamente elevados. Por tanto, un requisito fundamental es que no deben sobrepasarse los límites de dosis individual fijados por los órganos internacionales o permitidos por las autoridades nacionales competentes; en caso contrario, el procedimiento está injustificado.

Para juzgar el coste de la nocividad para la salud de una población o sopesar la aceptabilidad del riesgo para ciertos individuos debido a las radiaciones es importante aclarar ciertos conceptos, en particular los de "límites de dosis individual" y de "dosis colectiva".

Límites de dosis

Estos límites han sido fijados por la CIPR y se expresan en límites de dosis equivalente. Su objetivo es impedir que se produzcan efectos perjudiciales no estocásticos y reducir la frecuencia de los efectos estocásticos a un nivel lo bastante bajo para considerarlo aceptable.

Los efectos no estocásticos se caracterizan por una relación de causalidad entre la dosis y el efecto. Los efectos se manifestarán siempre que la dosis recibida alcance a supere cierto valor: el valor umbral. En el caso de dosis por encima del valor umbral, la gravedad de los daños estará relacionada con la dosis; cuanto más elevada la dosis, más graves los efectos.

Los efectos estocásticos presentan una relación dosis-efecto probabilística. Los efectos considerados aquí son la inducción de neoplasias y las lesiones genéticas. Se trata de efectos tardíos, ya que se requiere tiempo para la manifestación de las lesiones genéticas o de las neoplasias. Conviene señalar que, en el caso de los efectos estocásticos, la dosis recibida no afecta a la gravedad del efecto. Además, no es posible distinguir una patogénesis radio-incluida de otra espontánea.

Aunque sea posible impedir los efectos no estocásticos estableciendo límites por debajo de la dosis umbral, los límites de dosis para los efectos estocásticos se fijan con objeto de reducir el riesgo a un nivel aceptable. Además, aunque la forma de la curva de la relación dosis-efecto se conozca para dosis bastante elevadas, no es bien conocida para dosis bajas debido a las incertidumbres estadísticas relacionadas con la aparición espontánea de los efectos. Por consiguiente, al fijar los límites de dosis para los efectos estocásticos, se ha seguido un método prudente al suponer una proporcionalidad directa entre la dosis y el

Cuadro 1 — Factores de ponderación para calcular una dosis equivalente ponderada de interés en las evaluaciones del detrimento total

Organo	Factor de riesgo de la CIPR R_T (Sv^{-1})		W_T	Factor de riesgo total R_i (Sv^{-1})		W_i
Gónadas	0,4	10^{-2}	0,25	0,8	10^{-2}	0,50
Mama	0,25	10^{-2}	0,15	0,24	10^{-2}	0,15
Médula ósea roja	0,2	10^{-2}	0,12	0,2	10^{-2}	0,12
Pulmón	0,2	10^{-2}	0,12	0,2	10^{-2}	0,12
Tiroides	0,05	10^{-2}	0,03	0,10	10^{-2}	0,06
Hueso	0,05	10^{-2}	0,03	0,04	10^{-2}	0,02
Resto del cuerpo	0,5	10^{-2}	0,30	0,4	10^{-2}	0,24
Piel				0,02	10^{-2}	0,02
TOTAL	1,65	10^{-2}	1,00	2	10^{-2}	1,23

efecto (es decir, una relación sin umbral). Esto significa que una radioexposición, sea cual fuere, puede entrañar cierto grado de riesgo.

El principio básico para establecer los límites de dosis con respecto a los efectos estocásticos es el de que el detrimento aceptable para la salud debería ser igual, tanto es irradiado el cuerpo entero de modo uniforme como si no lo es. Para ello, para fijar los límites de dosis individual se utiliza el concepto de dosis equivalente (H_E). La dosis equivalente efectiva se define como:

$$H_E = \sum_T W_T H_T$$

donde W_T es un factor de ponderación que representa la proporción entre el detrimento debido a los efectos estocásticos mortales en el tejido irradiado T y el detrimento total debido a los efectos estocásticos cuando el cuerpo es irradiado uniformemente; H_T es la dosis equivalente media en el órgano o tejido T.

La columna 3 del Cuadro 1 indica los valores de W_T .

Aparte de los órganos enumerados en el Cuadro 1, se recomienda aplicar un factor de ponderación de 0,06 a cada uno de los cinco órganos del resto del cuerpo que reciban las dosis equivalentes más elevadas; puede despreciarse la exposición de todos los tejidos restantes. La CIPR, en su declaración de 1978 (informe N° 28 de la CIPR), señaló que las manos, antebrazos, pies, tobillos, piel y lente del cristalino no deberían incluirse entre los restantes órganos. Por tanto, estos tejidos se excluirán del cómputo $\sum_T W_T H_T$. Al

evaluar los detrimentos causados por la exposición de grupos de población, convendría tener en cuenta un pequeño riesgo de cánceres fatales resultantes de la exposición de la piel, y son esa finalidad se utilizará un valor $W_T = 0,01$.

Factores de riesgo

El análisis de costes-beneficios en protección radiológica es válido en una región de dosis individuales bajas, inferiores a los límites de dosis. Si se utiliza la proporcionalidad directa entre dosis y efecto se desprende que el detrimento para la salud es proporcional a la dosis equivalente efectiva resultante del procedimiento de que se trate. El factor de proporcionalidad se denomina "factor de riesgo"¹. La CIPR y el Comité de Radiaciones², después de pasar revista a un gran volumen de datos biológicos obtenidos con experimentos en seres humanos y en investigaciones con animales, sugirió factores de riesgo para efectos estocásticos resultantes de la exposición a radiaciones ionizantes. La CIPR ha tenido en cuenta estos factores de riesgo al establecer sus propios límites de dosis. Para una exposición profesional, la CIPR (informe N° 26) estimaba que "la tasa calculada a la que podrían inducirse neoplasias mortales por una exposición profesional a las radiaciones no debería en ningún caso superar la tasa de mortalidad profesional de las industrias reconocidas por poseer un alto nivel de seguridad". En general se reconoce que estas industrias seguras son aquéllas en las que la mortalidad anual media debida a riesgos profesionales no excede de 10^{-4} . Para miembros del público, la CIPR (informe N° 26) indica que, basándose en un examen de todas las informaciones disponibles relativas a riesgos aceptados normalmente en la vida cotidiana, puede concluirse que el nivel de aceptabilidad de riesgos mortales para el público en general es un orden de magnitud más bajo que para los riesgos profesionales. Sobre esta base, un riesgo comprendido entre 10^{-6} y 10^{-5} por año sería probablemente aceptable a cualquier miembro individual del público.

En protección radiológica no basta establecer un límite suficientemente bajo para el riesgo individual. Además, el detrimento total para la sociedad resultante del empleo de un procedimiento que entrañe una radioexposición debería mantenerse en el valor más bajo que razonablemente se pudiese conseguir, teniendo en cuenta los debidos factores económicos y sociales. El detrimento colectivo para la salud de un grupo de individuos es la suma de los detrimentos para los individuos que integran el grupo. Por tanto, suponiendo una proporcionalidad directa entre efectos biológicos estocásticos y dosis equivalente, el detrimento colectivo para la salud es directamente proporcional a la dosis equivalente efectiva colectiva. La dosis equivalente efectiva colectiva, S_E , en una población formada por N individuos es:

$$S_E = \bar{H}_E N$$

donde \bar{H}_E es la dosis equivalente efectiva per caput recibida por los individuos.

El número total de detrimentos para la salud (G_{total}) de una población de N individuos es por consiguiente:

$$G_{total} = k S_E$$

La constante de proporcionalidad $k = R \cdot g$,

donde R es el factor de riesgo para la manifestación del detrimento, y g el factor de gravedad.

Los factores de riesgo para varios órganos, fijados por la CIPR, figuran en la columna 2 del Cuadro 1. Estos factores de riesgo se utilizarán para calcular los cánceres mortales radioinducidos y los efectos hereditarios graves en las dos primeras generaciones. El factor de riesgo total es $1,65 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$, donde $1,25 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ representa los cánceres mortales radioinducidos y $0,4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ los efectos hereditarios graves para las dos primeras generaciones.

¹ Rigurosamente hablando la constante de proporcionalidad está integrada por dos constantes, es decir, el factor de riesgo y g , factor de gravedad (véase más adelante). Para los efectos mortales, g se considera igual a la unidad.

² Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas.

El factor de riesgo de $0,4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ para efectos hereditarios graves de las dos primeras generaciones se ha calculado teniendo en cuenta la estructura por edades del público en general y de los trabajadores. El informe N° 26 del CIPR dio un factor de riesgo de 10^{-2} Sv^{-1} para enfermedades hereditarias graves de las dos primeras generaciones subsiguientes a la irradiación de uno cualquiera de los progenitores. Sin embargo, en el público en general no todos los irradiados poseen plena capacidad de reproducción. Por tanto, solo una fracción de la dosis total colectiva a las gónadas es genéticamente significativa y, en consecuencia, a la dosis colectiva total debería aplicarse un factor de riesgo inferior a 10^{-2} por sievert-hombre. En el caso del público en general, un factor de corrección de $30/70 = 0,43$ sería adecuado, suponiendo que la edad media de procreación es de 30 años y una duración media de la vida de 70 años. Este factor de riesgo corregido ($0,4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$) figura en la columna 2 del Cuadro 1 frente a las gónadas.

La población laboral posee una estructura por edades distinta que incluye grupos de edad comprendidos entre 18 y 65 años, con intervalo de 47 años. El número de años de exposición antes de la edad de 30 años es 12, por lo que tal vez será necesario introducir un apropiado factor de corrección de $12/47 = 0,26$.

La diferencia en los factores de riesgo para el público en general y para los trabajadores no es lo bastante grande para justificar el empleo de factores separados de riesgo en los dos casos. Por consiguiente, la CIPR en su informe N° 26 sugiere el empleo de un factor unificado de riesgo de alrededor de $0,4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-2}$.

Al evaluar el detrimento para la salud, surgen nuevas consideraciones si se aplican factores de riesgo:

- i) Es posible que haya que tener en cuenta para el público en general un pequeño riesgo de cáncer mortal resultante de la exposición de la piel, por ejemplo, cuando toda la piel es expuesta a rayos β blandos. En este caso, el informe N° 28 de la CIPR sugiere utilizar un factor de riesgo de alrededor de 10^{-4} Sv^{-1} para la dosis media con respecto a toda la superficie de la piel, aplicándose un factor de ponderación de 0,01 para la evaluación de cánceres fatales de la piel.
- ii) Para órganos como el tiroides y la piel, la radioexposición, además de un efecto mortal, puede inducir un gran número de efectos no mortales, siendo estos últimos tan significativos como el primero. En el caso del tiroides y de la piel, se observa una incidencia dominante de cánceres no letales y se considera que los factores de riesgo son el doble que para los cánceres mortales, según se explicará más adelante.
- iii) El riesgo de lesiones hereditarias que puede expresarse en todas las generaciones posteriores por unidad de dosis se considera que es alrededor del doble del utilizado para las dos primeras generaciones únicamente (informe N° 26 de la CIPR).

Se supone que los factores de riesgo de cánceres no mortales son iguales a los de los cánceres mortales, según las siguientes consideraciones:

Si m denota el factor de mortalidad (la proporción entre la tasa de mortalidad y la de morbilidad), el riesgo per caput de efecto letal será mR , si R es el factor de riesgo total ($R_{\text{mortal}} + R_{\text{no mortal}}$) por unidad de dosis equivalente. Por consiguiente, el riesgo de efecto no mortal será $(1-m)R$. Sin embargo, si se da al riesgo mortal un factor de ponderación de la gravedad igual a la unidad, habría que atribuir al riesgo de efectos no mortales una ponderación mucho menor, probablemente inferior a la expresada por la fracción m . Si simplificamos la evaluación utilizando m también como factor de ponderación para la gravedad de efectos no mortales (un supuesto

bastante arbitrario), el detrimento total para la salud por unidad de dosis equivalente efectiva colectiva será:

$$m \cdot R + (1 - m) R \cdot m = m \cdot R (2 - m) \xrightarrow{\text{para } m \ll 1} 2m \cdot R = 2 \cdot R_{\text{mortal}}$$

Por tanto, será apropiado multiplicar el riesgo de efectos mortales por dos cuando haya una incidencia dominante de efectos no mortales (piel y tiroides).

∴ El detrimento total por unidad de dosis colectiva resultante de la irradiación uniforme del cuerpo entero será:

$$1,65 \times 10^{-2} (\text{cuerpo entero}) + 0,4 \times 10^{-2} (\text{gónadas}) + 0,02 \times 10^{-2} + 0,05 \times 10^{-2} (\text{tiroides}) \\ = 2,12 \times 10^{-2}$$

Este valor podría redondearse a 2×10^{-2} (columna 4 del Cuadro 1) reduciendo algo el detrimento resultante de la exposición de los órganos restantes.

En un análisis de costes-beneficios, el empleo del mencionado detrimento total para la salud plantea un problema práctico, puesto que suele intervenir en los cálculos la dosis equivalente efectiva colectiva en sievert-hombre y no el número ponderado probable de efectos perjudiciales. Como se ha mencionado anteriormente, esta cuestión está siendo examinada por un Grupo Asesor convocado por el OIEA. El informe provisional del Grupo sugiere transformar el detrimento total mencionado anteriormente en un compromiso "ampliado" de dosis equivalente efectiva comprometida. Con esa finalidad, convendría obtener un nuevo conjunto de factores de ponderación (W_i) para calcular una dosis equivalente ponderada utilizable en la evaluación del detrimento total (columna 5 del Cuadro 1).

En el Cuadro 1 se observa que para causar un caso de cáncer mortal o un efecto hereditario grave en las dos primeras generaciones después de una irradiación uniforme del cuerpo entero, la dosis equivalente (\bar{H}) necesaria es por término medio 60 Sv, derivada de la fórmula:

$$\bar{H} = \frac{W_T}{R_T} = 60 \text{ Sv}$$

En este caso, el factor de ponderación para el cuerpo entero es 1, que es la suma de los factores de ponderación para todos los órganos.

El cálculo del nuevo factor de ponderación W_i , que ha de considerarse al evaluar todos los detrimentos graves para la salud, puede basarse en uno de los siguientes valores:

- suponiendo $\bar{H} = 60$, que es el valor para el **efecto mortal**, y en este caso la suma de los factores de ponderación que tendrán en cuenta todos los detrimentos **graves para la salud** debería ser mayor que la unidad, como se indica en la última columna, es decir 1,23; o
- el factor de ponderación W_i debería relacionarse con la dosis equivalente media que produciría un cáncer mortal o no mortal y efectos hereditarios graves en todas las generaciones. Esta dosis sería $60/1,23 \cong 50$ Sv.

En este caso, el valor W_i debería ajustarse para alcanzar la unidad.

De ello se desprende que la dosis equivalente ponderada de interés en los análisis de costes-beneficios es un factor f mayor que la dosis equivalente efectiva. El factor f viene dado por:

$$f = \frac{\sum W_i H_i}{H_E} = \frac{\sum W_i H_i}{\sum W_T H_T}$$

Si solo están expuestas las gónadas o el tiroides, entonces $f = 2$. Como anteriormente, se ha excluido la piel del cálculo de $\sum_T W_T H_T$. Sin embargo:

$$f \cdot H_E = \sum W_i H_i = H_{\text{piel}}$$

lo que significa que la dosis equivalente ponderada pasa a ser la dosis equivalente para la piel.

Estas conclusiones están en armonía con la siguiente declaración de la CIPR hecha en la reunión de Brighton de 1980:

“La Comisión ha llegado a las siguientes conclusiones con respecto al empleo de la dosis equivalente efectiva en las evaluaciones de optimización. La adición de las futuras lesiones genéticas en el caso de una exposición uniforme del cuerpo entero añadiría un riesgo adicional de $0,4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$, en el caso del público o bastante menor en el caso de un trabajador medio, al riesgo total supuesto de $1,65 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$; es decir, aumentaría el detrimento total en un 24% como máximo. En el caso menos probable de que las gónadas recibiesen la dosis dominante, el daño genético sería dos veces mayor que el supuesto para la dosis equivalente efectiva únicamente.

“La importancia del detrimento adicional atribuido al cáncer no mortal dependería de la importancia atribuible a un período dado de vida de pérdida de la salud normal (durante la enfermedad antes de la curación) en relación con un período igual de pérdida de vida como resultado de la muerte por cáncer mortal. Si dicha importancia relativa (K) se supone que es 0,1 (como en la publicación N° 27 de la CIPR), la adición del detrimento debido a un cáncer no mortal y la inducción de tumores benignos solo aumentaría el detrimento total no genético en un 2%, en el caso de una exposición uniforme del cuerpo entero. Si solo resultan irradiados órganos como el tiroides y la piel, en los que los cánceres poseen una baja tasa de mortalidad, y si se supone que el valor de K es tan alto como 0,5, el detrimento total será aproximadamente el doble del supuesto debido al empleo de la dosis equivalente efectiva únicamente. Sin embargo, en la mayoría de los casos de exposición externa o de exposición a mezclas de radionucleidos, el empleo de la dosis equivalente efectiva únicamente no subestimaría el detrimento total”.

El detrimento adicional debido a un cáncer no mortal aumentaría el detrimento total no genético en un 2% aproximadamente, según se indica en la declaración de la CIPR, y en un 5% aproximadamente utilizando los factores de ponderación W_i (columna 5 del Cuadro 1). Esto es atribuible a diferentes métodos de cálculo del factor de gravedad g . En la declaración de la CIPR, g es proporcional a los años-hombre perdidos como resultado de los efectos perjudiciales, pero la segunda solución, mencionada en este artículo, considera g proporcional a la razón mortalidad/morbilidad.

3. COSTE DE LOS DETRIMENTOS

Como se ha mencionado anteriormente, la dosis equivalente efectiva colectiva suele utilizarse en los análisis de costes-beneficios. Podría aducirse que la relación entre el coste del detrimento para la salud y la dosis equivalente colectiva es directamente proporcional:

$$Y = \alpha S_E$$

donde Y = costo del detrimento para la salud; α = constante, referente al coste de la unidad de dosis equivalente colectiva; y S_E = dosis equivalente colectiva efectiva.

En condiciones ideales, si fuese posible llegar a un valor monetario universal para el costo de los efectos perjudiciales estocásticos para la salud provocados por la radiación, α tendría un valor único. En la práctica esto no es posible.

Al evaluar el costo del detrimento total podrá ser conveniente utilizar el factor de corección (f):

$$Y = f \alpha S_E$$

Sin embargo, como se ha explicado antes, la inclusión de f no modificará sustancialmente el resultado en la mayoría de las situaciones prácticas.

$$\therefore Y = \alpha S_E$$

El costo del detrimento para la salud resultante de la aplicación de un procedimiento en un año dado debería ser constante y, por tanto, α tiene que ser constante si el riesgo para el individuo es suficientemente pequeño. Esto debería garantizarse gracias a los límites de dosis básicos. Sin embargo, pueden ejercer influencia otros factores socioeconómicos. Estos factores pueden variar mucho de un país a otro e igualmente en función del tiempo. Es posible que las autoridades nacionales consagren recursos monetarios y esfuerzos suplementarios para alcanzar objetivos socioeconómicos y políticos no necesariamente requeridos por consideraciones de protección radiológica únicamente. Si se tienen en cuenta estos factores, un enfoque práctico consistiría en añadir otro término a la precedente ecuación. De esta manera

$$Y = \alpha S_E + \beta \sum N_i F(\bar{H}_i)$$

(Esta fórmula se basa en estudios actuales de la CIPR y de otras organizaciones internacionales, entre ellas el OIEA.)

donde \bar{H}_i es la dosis equivalente media per caput al individuo del grupo i integrado por N individuos (N_i).

El segundo término tendría en cuenta los factores sociales dependientes de circunstancias nacionales, por ejemplo, la percepción de riesgo y la distribución de las dosis equivalentes en el grupo expuesto.

En el plano internacional convendría facilitar informaciones sobre la primera parte de la ecuación. El segundo término incumbiría a las autoridades nacionales.

4. OPTIMIZACION DE LA PROTECCION RADIOLOGICA

A fin de optimizar la protección radiológica en un procedimiento dado, el coste diferencial que entraña reducir la dosis colectiva (S) de un nivel dado a niveles inferiores se compara con los beneficios diferenciales resultantes para la salud. El valor ALARA es aquel nivel de dosis colectiva por debajo del cual el costo de cualquier medida adicional de protección radiológica excedería del valor de la reducción del detrimento para la salud. Esta evaluación puede facilitarse si se asigna un valor monetario a la unidad de dosis colectiva (el valor de α mencionado anteriormente). Sin embargo, en la práctica no siempre se precisa un valor exacto de α , puesto que es posible conseguir disminuciones significativas de la dosis a bajo costo, y en estos casos no se necesita ningún análisis formal o un valor de α . A la inversa, sin un análisis en buena y debida forma es evidente a veces que, a pesar de que el posible mejoramiento sea excesivamente costoso, la reducción de dosis será despreciable. En ambos casos, podría utilizarse en lugar de un valor exacto un orden de magnitud para el valor de α .

La optimización de la protección radiológica debería en general efectuarse por separado para el público y para los trabajadores, aunque se requerirá cierta prudencia al decidir las proporciones relativas de los recursos disponibles a consagrar a cada uno de los grupos. Si se examina la posibilidad de compensar entre la exposición de los trabajadores y la del

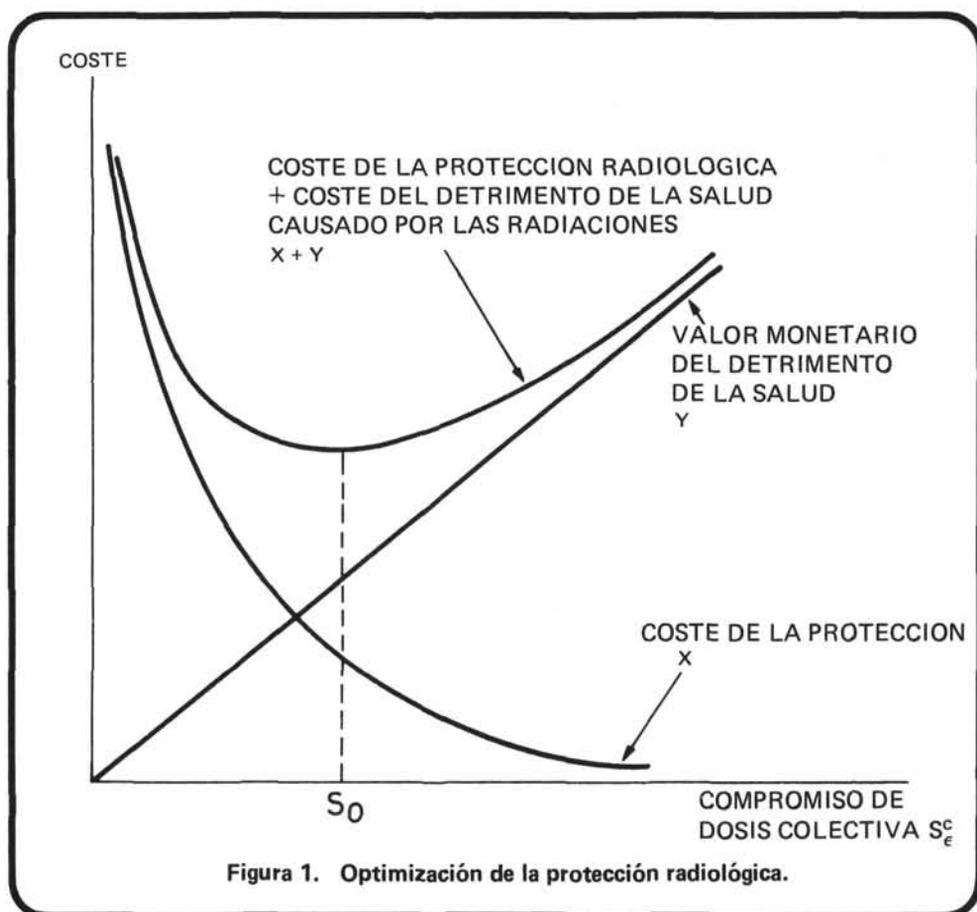


Figura 1. Optimización de la protección radiológica.

público, conviene tener presente que una reducción de un sievert-hombre en la exposición de los trabajadores no equivale necesariamente a una reducción de 1 sievert-hombre en la exposición del público.

En el pasado, la optimización de la protección se ha efectuado en la mayoría de los casos por métodos cualitativos y no cuantitativos. Hoy día gradualmente se persigue una optimización cuantitativa. Este método supone un análisis diferencial costes-beneficios. Por tanto, si la ecuación general costes-beneficios se diferencia con respecto a S , el beneficio neto óptimo se considera alcanzado a un valor S_0 de modo que

$$\frac{dV}{dS} - \left(\frac{dP}{dS} + \frac{dX}{dS} + \frac{dY}{dS} \right) = 0$$

Si V y P se consideran constantes, la condición de optimización se reduce a:

$$\frac{dX}{dS} = - \frac{dY}{dS}$$

Por consiguiente, en teoría, $dX/dS = -\alpha$ es la condición óptima para la protección radiológica (Fig.1).

Si el cambio de un nivel de protección a otro no viene descrito por una función continua sino por una función escalonada, la decisión de pasar de un nivel de protección A a otro más costoso B debería tomarse si:

$$\frac{X_B - X_A}{S_A - S_B} < \alpha$$

Excepto en la exposición médica de los pacientes con fines de diagnóstico o terapéuticos, hay que imponer una restricción a la optimización ya que la distribución de los beneficios y los detrimentos se refiere raras veces a los mismos individuos. Por esta razón, la optimización de la protección es solo adecuada si se garantiza a cada uno de los individuos un grado suficiente de protección. Esto se consigue respetándose los límites de dosis fijados para los individuos. En consecuencia, estos límites de dosis son una condición de contorno necesaria en los procedimientos de optimización.

En la práctica, la optimización de la protección radiológica es a menudo difícil y compleja cuando hay que optimizar varios subsistemas. El proceso sería menos difícil si los subsistemas a optimizar fuesen independientes y no relacionados entre sí. En este último caso puede resultar necesario examinar si merece la pena realizar un esfuerzo adicional para obtener adicionales reducciones de la dosis colectiva.

5. OBSERVACIONES

El valor de α en términos monetarios (ajustado para tener en cuenta la inflación) debería ser constante en teoría. Sin embargo, en la práctica la situación es muy distinta. Un estudio de los trabajos publicados indica una amplia gama para valores de α , comprendidos entre 1000 y 100 000 dólares por sievert-hombre. Esta gama de α refleja los diferentes métodos utilizados para valorar el detrimento. Los métodos más comunes de evaluación de α recurren arbitrariamente a diferentes asignaciones, metodologías de evaluación de la vida y encuestas directas.

Los economistas han empleado diversos enfoques para evaluar la manera como la sociedad asigna valores a la vida humana, los cuales pueden servir para obtener el valor de α si se multiplican por el factor de riesgo. Los valores calculados no suponen un valor monetario real de la vida. En vez de ello, tienen por objetivo facilitar medidas para una asignación justa y armónica de los recursos a los fines de protección radiológica. Como estas medidas varían de un país a otro y en el tiempo, variará igualmente el valor de α .

En conclusión, el análisis de costes-beneficios puede utilizarse en protección radiológica para justificar el empleo de procedimientos que entrañen una exposición a las radiaciones ionizantes y para aplicar el principio ALARA. Debe reconocerse que la base de datos de estos análisis varía desde informaciones bien identificadas y cuantificables hasta informaciones de carácter subjetivo e imponderables. En el análisis de costes-beneficios se plantean problemas éticos al tratar de asignar un valor monetario a la vida humana.

El análisis de costes-beneficios puede plantear problemas de tipo local o global u otros que se refieren al momento actual o a un futuro distante. Sin embargo, dicho análisis, aplicado a la protección radiológica, ayuda a las autoridades encargadas de adoptar decisiones y contribuye a la aceptación y comprensión por el público de procesos que entrañan la exposición a las radiaciones.