

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1974

06.74.05

CNA/11

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

CENTRAL NUCLEAR EN ATUCHA

"PRINCIPIOS BASICOS DE
PROTECCION RADIOLOGICA"

Dr. Dan J. Beninson

Apuntes de curso

Buenos Aires-Argentina

- 1974 -

PRINCIPIOS BASICOS DE PROTECCION RADIOLOGICA

Dr. Dan Beninson

1 - Objetivos de la protección radiológica

Los objetivos básicos de la protección radiológica son prevenir la ocurrencia de efectos agudos y limitar, a niveles considerados aceptables, la probabilidad de ocurrencia de efectos tardíos. El primero de estos objetivos se logra fácilmente debido a la existencia comprobada de umbrales y la influencia marcada de las tasas de dosis. El segundo objetivo se relaciona con problemas mucho más complicados, sobre todo debido a la ausencia de datos humanos a los niveles de riesgo que se considerarían seguros. Ha sido práctica normal en protección radiológica el adoptar una hipótesis cauta, es decir considerar que existe una relación lineal sin umbral entre la dosis y la probabilidad de efectos tardíos, tales como la inducción de neoplasias y los efectos deletéreos hereditarios. Además se supone que el riesgo por unidad de dosis deducido de observaciones a dosis y tasas de dosis altas se aplica en el rango de dosis y tasas de dosis de interés para la protección radiológica.

Una consecuencia implícita de estas hipótesis es el hecho que ninguna exposición a las radiaciones es totalmente segura. El punto fundamental es entonces la aceptabilidad de los riesgos correspondientes en relación tanto con la aceptabilidad de otros riesgos por parte de la sociedad, como con los beneficios esperados de las operaciones que producen la exposición.

Los principios básicos de la protección radiológica se basan en las recomendaciones del International Commission on Radiological Protection (ICRP), que son las bases de la mayor parte de las normas de seguridad nacionales e internacionales.

En general, se aplican las siguientes condiciones para la protección radiológica :

- 1 - Las dosis recibidas por individuos (tanto ocupacionalmente expuestos como del público) no deben exceder los correspondientes límites de dosis recomendados por el ICRP;

- 2 - El detrimento total debido a las radiaciones, originado por cualquier práctica u operación, no debe ser injustificable con respecto al beneficio que se obtenga de dicha práctica u operación;
- 3 - Todas las dosis de radiación debidas a exposiciones justificables deben ser mantenidas tan bajas como sea razonablemente realizable, teniendo en cuenta consideraciones sociales y económicas.

La condición 1. implica la evaluación de la exposición total de un dado grupo de población; las condiciones 2. y 3., por otro lado; implican una evaluación de todas las exposiciones que están relacionadas con una dada fuente.

Además de las condiciones de protección radiológica arriba mencionadas, es esencial tomar en cuenta futuros desarrollos cuando se limitan las exposiciones a la radiación debidas a las prácticas actuales. Esto puede hacerse convenientemente evaluando la dosis comprometida por unidad de práctica (expresada en M W. año) Como se discutirá más adelante, el uso de este concepto permite mantener bajo control las dosis resultantes de la operación rutinaria de varias fuentes simultáneas.

2 - Límites de dosis

Los límites de dosis del ICRP generalmente se refieren a individuos, pero en el caso de las "dosis genéticas" se tiene en cuenta la población en su conjunto. Dichos límites de dosis se refieren a condiciones en las cuales la fuente de exposición está sujeta a control y tienen como objetivo integrar normas de protección que hacen poco probable que individuos o poblaciones reciban más que una dosis determinada a partir de todas las fuentes de radiación, excluyendo las fuentes naturales y los procedimientos médicos (en lo referente a dosis a los pacientes). La exención de las últimas fuentes puede realizarse debido a la suposición implícita de una relación lineal entre el riesgo y la dosis acumulada, lo que implica también que cualquier incremento de dosis acarrea un riesgo que es independiente de las dosis previas.

El riesgo originado por exposiciones médicas, por lo tanto, puede ser evaluado en relación con el beneficio directo para el paciente. Se da por sentado que el riesgo inevitable originado por la radiación natural no afecta el riesgo adicional debido a fuentes

de radiación hechas por el hombre. Por ello este último riesgo puede ser evaluado separadamente, en conexión con los beneficios esperados de dichas fuentes.

Los límites recomendados por el ICRP para individuos expuestos ocupacionalmente (Dosis Máximas Permisibles), tienen en cuenta la inhomogeneidad de las dosis recibidas por el personal en el curso del trabajo, y aseguran que el riesgo promedio (en la hipótesis lineal) no exceda el riesgo presente en las industrias de alto standard de seguridad.

Los límites de dosis recomendados por el ICRP para miembros individuales de la población (Límites de Dosis) están dados en términos de valores anuales iguales a $1/10$ de las Dosis Máximas Permisibles aplicables a la exposición ocupacional (excepto para la tiroides de los niños, para la cual el límite de dosis es $1/20$ de la D M P).

El cumplimiento de la limitación de dosis para miembros del público es controlado no por monitoreo de individuos como en el caso de la exposición ocupacional, sino por evaluaciones basadas en procedimientos de muestreo en el ambiente. Las dosis reales recibidas por los individuos variarán dependiendo de varios factores individuales y es imposible determinar la dosis máxima que podría ser recibida individualmente. En la práctica es posible tomar en cuenta dichas fuentes de variación seleccionando "grupos críticos" adecuados dentro de la población, siempre que el grupo crítico sea suficientemente pequeño como para ser homogéneo con respecto a los parámetros que afectan la dosis recibida. Dicho grupo debe ser representativo de aquellos individuos de la población que reciban la más alta dosis, y el ICRP dice que es razonable aplicar los Límites de Dosis apropiados a la dosis promedio de este grupo.

Además de recomendar límites de dosis individuales el ICRP ha recomendado que la "dosis genética" para poblaciones en su conjunto debe ser mantenida en el mínimo valor consistente con la necesidad y que no debe, por cierto, exceder 5 rem (adicionales a las dosis de fuentes naturales y a las exposiciones médicas de las pacientes). La "dosis genética" a una población es la dosis que, si fuera recibida por cada persona desde la concepción hasta la edad promedio de reproducción, daría la misma carga genética a toda la población que la dosis real recibida por los individuos. La dosis genética puede ser evaluada como la "dosis anual genéticamente significativa"

(según la definición del UNSCEAR) multiplicada por edad promedio de reproducción, que puede ser tomada como 30 años. Es importante señalar que el límite de dosis genética es un valor que no debe interpretarse como fraccionable en porciones, sino como el resultado de diversas contribuciones mínimas, cada una justificada por los beneficios que no se recibirían de otro modo. Esta suma puede ser mantenida por debajo de 1 rem. en el futuro previsible.

Los límites de dosis se refieren a situaciones controlables. Dichos límites implican acuerdos sobre los riesgos máximos aceptables y no están relacionados con ninguna discontinuidad hipotética (nivel desencadenante) en la relación dosis-riesgo.

Los límites de dosis no son aplicables en situaciones no controlables, p.e. en una alta contaminación ambiental localizada como resultado de un accidente. En dichos casos se puede considerar la necesidad de aplicar contramedidas como por ejemplo desechar alimentos contaminados. En el acto de decidir dichas contramedidas no se puede suponer que tenga valor alguno la comparación de las dosis con los límites de dosis. En cambio, a partir de consideraciones riesgo-beneficio de las acciones contempladas, se pueden deducir "niveles de acción".

Los "niveles de acción" (p.e. de dosis proyectadas) sólo raramente pueden ser determinados con anticipación, a menos que sean conocidos el tipo de acción y también sus consecuencias. En algunas circunstancias se pueden especificar con anticipación niveles de no acción, por debajo de los cuales puede decirse que siempre las acciones posibles son injustificables.

3 - Dosis colectivas y Detrimento

Algunas de las condiciones de protección radiológica mencionadas anteriormente requieren la evaluación de dosis colectivas, definidas como $S = \sum_i D_i \cdot N_i$, donde D_i es la dosis promedio recibida por los individuos en el grupo i y N_i en el número de individuos en el grupo. La dosis colectiva puede ser evaluada para un grupo, para una sub-población o para la población en su totalidad. La última evaluación es la requerida en el caso de "evaluaciones relacionadas con la fuente", como las mencionadas en las condiciones (2) y (3) del punto 1.

La unidad de "dosis colectiva" es el producto de una

unidad de dosis (rad o rem) y una unidad de individuos en un grupo (hombre); las unidades resultantes son rad.hombre y rem.hombre. La "dosis colectiva" puede ser usada para evaluar la esperanza matemática del número de efectos deletéreos en una población dada, suponiendo la linealidad. Como ya se mencionó antes, ésta es una hipótesis cauta hecha con fines de protección radiológica, y por lo tanto las evaluaciones del daño pueden incluir grandes sobreestimaciones.

El "Detrimento" en una población, según la definición del ICRP, es la esperanza matemática de daño como consecuencia de una dosis de radiación, tomando en cuenta no sólo la probabilidad de cada tipo de efectos deletéreos sino también la gravedad de estos efectos. Si p_j es la probabilidad de sufrir un efecto j cuya gravedad se expresa por un factor de ponderación g_j , el detrimento G en un grupo compuesto por P personas es $G = P \sum p_j g_j$. Suponiendo linealidad de cada p_j con la dosis ($p_j = r_j D$, donde r_j es un coeficiente de riesgo), y además suponiendo que la gravedad de los efectos estocásticos es independiente de su frecuencia, el detrimento puede expresarse como $G = S \sum r_j g_j$, donde la suma es una constante independiente de la "dosis colectiva" S .

La dosis colectiva por lo tanto, puede ser considerada como la representación del detrimento en una población. Para comparaciones con los beneficios al evaluar la justificación de una fuente, o con los costos involucrados en la reducción de un nivel de radiación dado, es conveniente asignar un valor monetario a la unidad de "dosis colectiva". Esto puede ensayarse usando diversos enfoques, tal como asignar un valor a la suma $\sum r_j g_j$, o alternativamente observando los valores que la sociedad acepta pagar para reducir las dosis colectivas en ciertas prácticas. Se han publicado en la literatura diversas evaluaciones del costo equivalente del rem hombre y se han propuesto valores que varían entre la decena y centenas de dólares (Tabla 1). El informe BEIR del Comité de la National Academy of Sciences da una estimación entre 12 y 120 dólares. El valor de 100 dólares corresponde a una estimación del "valor de la vida humana" de 10^6 dólares y un factor de riesgo de 10^{-4} por rem hombre. Debe señalarse que estos valores están basados en el detrimento resultante de la irradiación de todo el cuerpo. En el caso de la exposición de tiroides, dado que el detrimento es bastante más bajo, el valor del rem hombre debiera ser también más bajo (del orden de 1/20-1/10 del valor anterior).

TABLA 1

Valores del detrimento

(dólares por rem hombre)

- Otway	20	(1)
- Courts	5-50	(1)
- Beninson	10-100	(1)
- Capitales productivos	20	(1)
- Compañías de seguros	13-100	(1)
- Líneas aéreas comerciales (USA)	40	(1)
- Cohen	250	(2)
- Hedgran y Lindell	200	(2)
- Dunster	10	(2)
- Lederberg	100-600	(2)

(1) Valores deducidos del "costo de la vida humana", suponiendo la probabilidad de muerte en 10^{-4} por rad.

(2) Valores obtenidos por otros métodos (generalmente encuestas)

4 - Dosis Colectiva comprometida

En general, la dosis colectiva comprometida debida a cualquier decisión práctica u operación especificadas es la integral temporal infinita de la tasa de dosis promedio producida por dicha decisión, práctica u operación en una dada población multiplicada por el tamaño de dicha población.

$$S_c = \int_0^{\infty} \bar{H}(t) \cdot P(t) \cdot dt ,$$

donde $\bar{H}$ es la tasa de dosis promedio equivalente y S_c la dosis colectiva comprometida.

La población sobre la cual se promedia la tasa de dosis puede no estar compuesta de los mismos individuos durante el

período de integración; más aún pueden abarcarse muchas generaciones.

El uso de la dosis colectiva comprometida total de la población mundial $\sum_j S_{cj}$, debida a todas las fuentes j , como medio para controlar la dosis promedio total futura no está basado en ninguna suposición biológica. Es puramente la consecuencia matemática del hecho que la dosis anual (D_1) en una futura situación de equilibrio será :

$$D_1 = \frac{1}{P} \sum_j S_{c1j}$$

donde S_{c1j} es la dosis colectiva comprometida debida a un año de práctica relacionada con la fuente j . No obstante, la hipótesis lineal es inherente al establecimiento de un límite para la dosis promedio total futura, tal como p.e. el límite de dosis genética recomendado por el ICRP.

5 - Justificación de la exposición

Para satisfacer este requerimiento es necesario demostrar que el detrimento resultante del funcionamiento de una instalación es contrabalanceado por los beneficios resultantes de su operación. Para ello deben usarse técnicas de análisis costo-beneficio. Dos términos entran en la comparación :

- El costo, que incluye todos los gastos de capital y de operación más los costos directos e indirectos asociados con los efectos de la radiación.
- Los beneficios, que incluyen el valor del producto y todos los beneficios directos e indirectos para la población en su conjunto.
- En un análisis general, el beneficio neto B de una instalación puede expresarse por :

$$B = V - P - X - Y \quad (1)$$

donde V es el valor del producto.

P es el costo total de la producción, excluyendo la protección.

X es el costo de la protección.

Y es el costo del detrimento debido a la radiación.

La exposición no puede justificarse si B es negativo, pero se vuelve crecientemente justificable al tomar B valores positi-

vos crecientes.

Debe destacarse que un análisis como el mencionado considera la protección radiológica como uno de los elementos del costo; en general su valor X es pequeño frente al costo total $(P + X + Y)$.

La justificación de la exposición no es fácil, dado que, como en muchas otras actividades, el grupo de población que sufre el detrimento puede no ser el grupo que se beneficia; por lo tanto esta justificación no tendrá sentido a menos que los riesgos individuales sean despreciables. El cumplimiento de los límites de dosis asegura la vigencia de la condición mencionada y por lo tanto, en este caso, una justificación basada en el análisis costo-beneficio puede ser considerada aceptable.

6 - Optimización de la protección radiológica

Para determinar si una ulterior reducción de la exposición es "razonablemente realizable", es necesario considerar por un lado las ventajas de dicha reducción, y por otro el costo para lograrlo. Esto quiere decir que debe llevarse a cabo un análisis diferencial costo-beneficio.

En este análisis diferencial, V y P en la ecuación (1) son consideradas constantes

X e Y son variables y pueden ser expresados en función de la dosis colectiva (S) de la población.

La figura 1 ejemplifica las funciones $X = f(S)$ e $Y = f(S)$. Esta última puede ser considerada una recta si se supone linealidad de los efectos con la dosis.

Puede observarse que B alcanza un máximo cuando la suma $X+Y$ es mínima. El valor mínimo de $X+Y$ se obtiene cuando

$$\frac{dX}{dS} = - \frac{dY}{dS} \quad , \text{ siempre que se cumplan las dos}$$

condiciones siguientes :

- 1 - Las exposiciones individuales deben ser inferiores al límite de dosis;
- 2 - El beneficio B debe ser positivo.

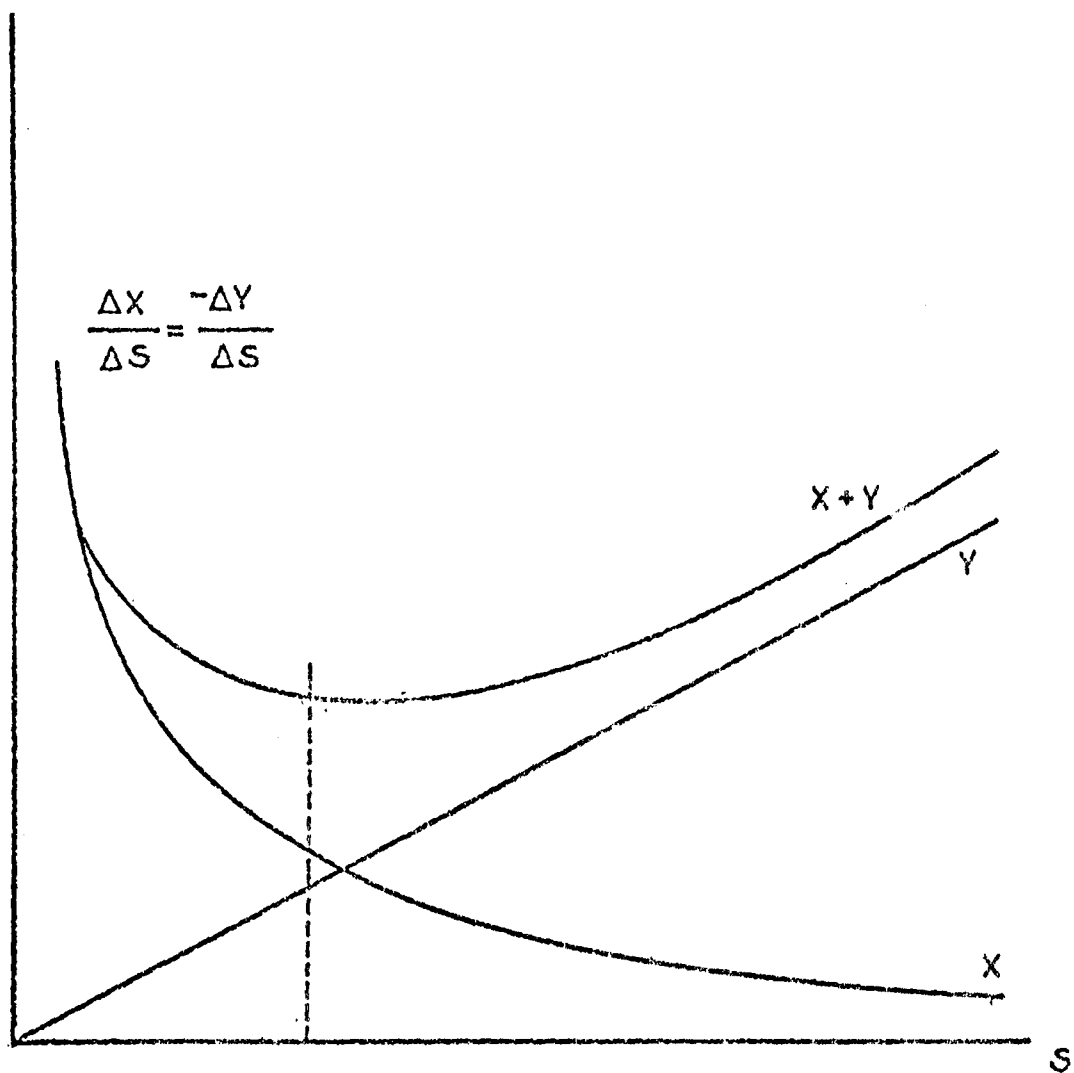


Figura 1 - Análisis diferencial.

S = dosis colectiva (rem hombre)

X = costo de la protección radiológica correspondiente a la dosis colectiva S .

Y = costo del detrimento debido a la dosis colectiva S .

Puede observarse que el mínimo de $X + Y$ corresponde a un valor de S tal que el costo para lograr un nivel menor de exposición sería mayor que el valor representado por la reducción del detrimento. Esto es consistente con el párrafo 47 de la Publicación N°9 del ICRP, que dice que "la limitación debe ser fijada a un nivel suficientemente bajo de modo que toda reducción adicional del riesgo no justifica el esfuerzo requerido para su logro". Además el nivel resultante está de acuerdo con la recomendación del párrafo 52 de dicha publicación.