

# METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE RESTRICCIONES DE DOSIS OCUPACIONALES

A. Hernández<sup>1</sup>, E. Callís<sup>1</sup>, N. Cornejo<sup>1</sup>, G. López<sup>1</sup>, M. Prendes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones, La Habana, Cuba

## RESUMEN

**Introducción:** Las restricciones de dosis y de riesgo se establecen teniendo en cuenta valores de dosis optimizados observados en prácticas similares, donde se aplique adecuadamente un programa de protección radiológica. Deben revisarse sistemáticamente para adecuarlas a las regulaciones y al desarrollo tecnológico. **Objetivo:** Desarrollar una metodología que permita calcular restricciones de dosis ocupacionales para prácticas con radiaciones ionizantes. **Metodología:** Caracterización multifactorial de las prácticas mediante la modelación de los escenarios de exposición, los resultados de la vigilancia radiológica individual y la evaluación de las exposiciones potenciales. **Resultados:** Se aplicó la metodología desarrollada a una estadística adecuada en cuanto al total de prácticas y años de trabajo. Las restricciones de dosis obtenidas son similares a las propuestas por otros autores y a las establecidas por diferentes Autoridades Reguladoras. **Conclusión:** La metodología desarrollada permite obtener restricciones de dosis adecuadas al concepto de buenas prácticas, teniendo en cuenta las particularidades de las mismas.

## 1. INTRODUCCIÓN

La aplicación y cumplimiento de los límites de dosis no es condición suficiente para la optimización de la seguridad. Los límites de dosis y riesgos representan la frontera entre lo tolerable y lo inaceptable por la sociedad. Son el techo todas de las prácticas, pero no el valor óptimo de cada una de ellas.

Las restricciones de dosis y riesgos se establecen para acotar, de forma prospectiva, el intervalo de opciones que pueden ser consideradas durante la optimización, en cada una de las prácticas. El establecimiento de las restricciones de dosis y riesgos debe basarse en la información disponible de buenas prácticas y en la experiencia de trabajo en condiciones particulares. Deben revisarse sistemáticamente para considerar las posibles modificaciones en las regulaciones y los adelantos tecnológicos [1].

En cualquier estudio de optimización es razonable utilizar comparaciones con instalaciones similares, con datos publicados por organismos internacionales y Autoridades Reguladoras. Es necesaria además, la participación de trabajadores con experiencia durante la caracterización de los escenarios de exposición. Es recomendable acopiar información sobre el comportamiento de prácticas similares [2, 3] donde se apliquen criterios de gestión aceptados (buenas prácticas). En el presente estudio, parte de la información de las prácticas y los datos que permitieron evaluar aspectos tales como: las dosis individuales, las características de las operaciones y los sucesos más frecuentes; fueron obtenidos mediante el procesamiento de los datos de la vigilancia radiológica individual (VRI) de los trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOEs) de las instituciones participantes en el estudio y mediante la aplicación de encuestas y visitas a las instalaciones.

---

1. E-mail del autor: ate@cphr.edu.cu

El análisis de los datos de la VRI con el objetivo de proponer restricciones de dosis ha sido tratado por otros autores [4, 5]. En estos trabajos, los valores se establecieron utilizando directamente los valores entre 70 – 75 percentil de los datos analizados.

En el tratamiento de las exposiciones potenciales, en ausencia de datos confiables de la experiencia operacional, secuencias de eventos con una probabilidad anual entre  $10^{-1}$  y  $10^{-2}$ , que conduzcan a dosis en el intervalo de las dosis ocupacionales habituales, pudieran ser consideradas dentro de la exposición normal [6, 7].

A pesar de seguir procedimientos más o menos universales, las prácticas con radiaciones tienen particularidades tecnológicas, de personal, etc. Dado que las restricciones de dosis que establece una Autoridad Reguladora, son aplicables en todo un país y deben ser lo suficientemente consistentes y duraderas; es razonable que los valores que se utilicen tengan en cuenta estas particularidades. Para establecer un margen de prudencia que abarque las posibles fluctuaciones de los parámetros mencionados se propone el uso de factores de reserva, que garantizaría que las restricciones propuestas no sean continuamente sobrepasadas. Con esto se evita el establecimiento de un valor de dosis muy restrictivo, obtenido mediante el análisis de datos que pudieran estar sesgados, al provenir de instituciones con mejores condiciones materiales o de capacitación del personal. Dichos factores constituyen un juicio de experto que engloba, en un número, los aspectos variables durante los análisis de optimización.

## 2. CÁLCULO DE LAS RESTRICCIONES

En el trabajo se caracterizaron las prácticas médicas de Medicina Nuclear – diagnóstico – (MN), Teleterapia (TT) y Braquiterapia de Baja (BBTD) y Alta Tasa de Dosis (BATD), así como las prácticas industriales de Radiografía Industrial - con rayos X y con fuentes de radiación gamma – (RI-X y RI-G respectivamente) y de Medidores Nucleares (Med. Nuc.).

La determinación de los intervalos de variación de las dosis individuales anuales en operación normal se realizó mediante la modelación de los escenarios de exposición y mediante el procesamiento de los datos de la VRI en un período de más de diez años.

Para modelar los escenarios de exposición normal y estimar la exposición potencial se elaboraron y aplicaron encuestas para cada una de las prácticas estudiadas. Las encuestas permitieron determinar: las operaciones, sus tiempos de duración y frecuencias de aplicación, distancias a las que se ubican los trabajadores, tipo de radiación a la que se expone la persona, las principales situaciones anormales, etc. Estos datos, complementados con mediciones realizadas durante visitas de evaluación, permitieron estimar las tasas de dosis y las dosis por operación.

Un punto de partida útil para el establecimiento de restricciones de dosis sería un análisis de las distribuciones de dosis en las operaciones de un tipo determinado que se estimen bien controladas. La restricción de dosis podría fijarse hacia el extremo superior de dicha distribución [1].

La base de datos del Servicio de VRI de la Exposición Externa del Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones aportó los datos de la dosimetría. Los datos cubren un período de 14 años (1990-2003) y un total de 49 entidades del país, 23 hospitalarias y 26 industriales. La

cantidad de datos analizados para cada práctica fue: 1897 para MN, 783 para TT, 423 para BBTD, 21 para BATD (una sola institución), 505 para RI-X, 361 para RI-G y 467 para Med. Nuc. Los niveles mínimos de registro para los dosímetros filmicos y termoluminiscentes fueron 0.2 y 0.1 mSv respectivamente. Los valores de dosis reportados inferiores a éstos se consideraron igual a cero y así tenidos en cuenta en la estimación del intervalo de dosis. Con estos datos, se obtuvieron las distribuciones de dosis individuales anuales para cada institución y práctica estudiada, así como los respectivos valores del 75 percentil.

Para la evaluación de las exposiciones potenciales en cada una de las prácticas se consideraron los sucesos típicos identificados durante la aplicación de las encuestas, así como los recogidos en la bibliografía [8]. En las instalaciones médicas de terapia se estimó fundamentalmente sobre la base de la experiencia [9] y los datos estadísticos reportados internacionalmente [8], a partir de los árboles de fallas diseñados para ellas. Los sucesos vinculados con fuentes no selladas se relacionan principalmente con derrames del propio material radiactivo o de fluidos corporales de pacientes (vómito y orina) y daños a su contención [10].

La estimación del factor de reserva (F) se ha concebido específicamente para cada práctica y varía en dependencia de los cambios en los escenarios de exposición y las proyecciones de trabajo futuro de cada una de ellas. La mejor estimación del valor de F se obtuvo en base a valoraciones de expertos consultados en cada una de las prácticas estudiadas.

El primer componente en el cálculo es el valor apropiado de dosis por la exposición normal en la práctica ( $D_n$ ). Para la selección de este valor se utilizaron dos métodos que se describen a continuación. Su representación gráfica se muestra en la figura 1:

1. Cuando la carga de trabajo para una práctica dada, durante el período de tiempo en que se desarrolló el trabajo, resultaba significativamente inferior a los valores esperados (resultado de que la actividad en que se aplicaba dicha práctica se encontraba deprimida), se adoptó la modelación de las condiciones de exposición y se seleccionó el valor máximo del intervalo de dosis obtenido.
2. Cuando se trataba de prácticas donde la carga de trabajo se correspondía con los valores esperados, se consideró más apropiado obtener el valor de dosis utilizando los resultados de la VR. Para este caso se eligió el 75 percentil de la distribución de dosis del universo de trabajadores de la práctica.

Al valor de  $D_n$  se le sumó la dosis que se recibiría en aquellos sucesos potenciales ( $D_p$ ) con una probabilidad de ocurrencia similar o mayor que  $10^{-2}$ , es decir:

$$Dt = Dn + Dp, \quad (1)$$

donde:

$Dt$ : Dosis total;  $Dn$ : es la dosis por exposiciones normales y

$Dp$ : es la dosis debida a sucesos potenciales con probabilidad anual  $\geq 10^{-2}$ .

Por último, el valor de la restricción de dosis (R) se obtiene mediante la multiplicación del factor de reserva (F) por la dosis total ( $Dt$ ).

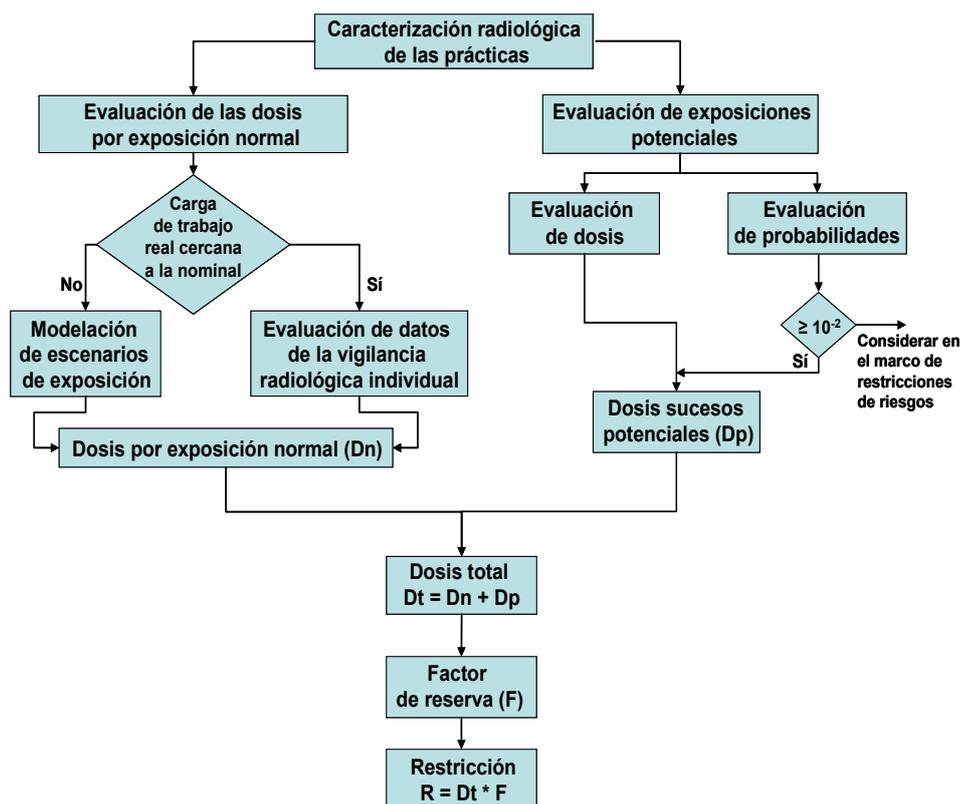


Figura 1. Esquema de la metodología empleada.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Tabla 1. Dosis ocupacionales anuales recibidas en las diferentes prácticas.

Práctica	Dosis efectiva anual [mSv]	
	Modelación escenarios*	Vig. Rad.**
MN	1,95 – 4,40	2,50
TT	1,20 – 2,00	2,52
BBTD	1,83 – 2,49	2,50
BATD	0,54 – 2,28	1,36
RI-X (Recintos Blindados)	1,50 – 2,00	0,58
RI-X (Pruebas de Campo)	2,00 – 3,00	0,58
RI-G (Recintos Blindados)	0,00 – 3,60	0,90
RI-G (Pruebas de Campo)	0,00 – 4,60	0,90
Med. Nuc.	0,10 – 0,30	0,34

\* Intervalos de dosis mínima y máxima obtenidos por cálculo, como sumatoria de la dosis provocada por cada operación dentro de la práctica.

\*\* Valor del 75 percentil de la dosis (datos la VRI) para todo el universo de trabajadores bajo VRI, agrupados por práctica.

En dependencia de la correspondencia de la carga de trabajo real con la utilizada para modelar la exposición, se seleccionó uno u otro dato para asumir la dosis anual por exposición normal (Dn). Las celdas sombreadas indican los valores seleccionados para el cálculo de las restricciones.

En las prácticas médicas, en general, los resultados de la VRI fueron similares a las dosis modeladas y se decidió utilizar el valor del 75 percentil de la VRI. La excepción en este tipo de aplicación se hizo con la BATD. Aquí se utilizaron los valores de la modelación debido al insuficiente número de datos de la VRI.

En las prácticas industriales, el período de tiempo seleccionado para el estudio se caracterizó por una marcada disminución de la carga de trabajo y por tanto, una diferencia notable entre los valores calculados por la modelación y los resultados de la VRI. Por esta razón, no era apropiado utilizar el valor del 75 percentil de la VRI y se adoptaron los valores de las evaluaciones de los escenarios.

La selección del valor de Dn la práctica de Med. Nuc. es una excepción en las aplicaciones industriales. Sus regímenes de explotación se mantuvieron sin afectaciones importantes y además, se consideró que en algunos tipos de medidores fijos, la modelación de escenarios puede que no refleje de manera adecuada la exposición de los trabajadores debido a las distancias de operación, el tipo de emisión de las fuentes que utilizan, etc. Por estas razones se consideró apropiado utilizar el valor del 75 percentil de la VRI.

Para cada suceso anormal con implicaciones para la exposición ocupacional se estimó la probabilidad anual de ocurrencia y las dosis que potencialmente se recibirían [9]. La tabla 2 muestra los sucesos que, luego de la evaluación, resultaron con probabilidad anual mayor que  $10^{-2}$  y por tanto, fueron tenidos en cuenta para el cálculo de la restricción.

**Tabla 2. Evaluación de sucesos potenciales con implicaciones para la exposición ocupacional.**

Suceso	Probabilidad anual	Dosis estimada (mSv)
<b>Medicina Nuclear</b>		
Derrame insignificante	$\sim 8 \times 10^{-2}$	$\sim 0,1$
<b>RI-X (recintos blindados y pruebas de campo)</b>		
Entrada inadvertida a la zona controlada	$10^{-2} - 2 \times 10^{-2}$	$\sim 0,8$
<b>RI-G (recintos blindados y pruebas de campo)</b>		
Atascamiento de la fuente durante la irradiación	$10^{-2} - 10^{-1}$	$\sim 1$
Entrada inadvertida a la zona controlada	$10^{-2} - 2 \times 10^{-2}$	$\sim 0,6$

Para la estimación de los Factores de Reserva, en las prácticas médicas, los estudios de tendencia mundial [11] muestran un incremento sostenido de las aplicaciones en MN, TT y Braquiterapia. Teniendo en cuenta las condiciones particulares de Cuba y sus planes de

desarrollo futuro, se consideró que las exposiciones en MN incrementarían en un 50 % las dosis presentes ( $F=1.5$ ). En el caso de la Teleterapia se estimó que las exposiciones futuras aportarían un 20 % adicional ( $F=1.2$ ). En la Braquiterapia, a pesar de preverse una incorporación paulatina de nuevos servicios de Braquiterapia Remota de ATD en sustitución de los procedimientos manuales, y que sus procedimientos inciden en la disminución de las dosis recibidas por los trabajadores, la aplicación de un Factor de Reserva mayor que 1 ( $F=1.3$ ) tendría en cuenta el incremento anual en el número de pacientes tratados, al sustituir las técnicas de baja y media tasa de dosis.

Las opiniones consultadas en relación con la aplicación de la Radiografía Industrial indicaron un previsible aumento futuro en el número de entidades que apliquen esta práctica, así como en la carga de trabajo. Por esta razón se estimó que las exposiciones futuras incrementarían en un 50 % las dosis presentes ( $F=1.5$ ).

Las particularidades de las condiciones de irradiación en Med. Nuc. Hace que no sea razonable proponer un Factor de Reserva mayor que 1. Sin embargo, las dificultades asociadas con el control periódico de la exposición mediante la aplicación de niveles de investigación, para restricciones tan bajas como las que se obtuvieron para esta práctica, hacen recomendable proponer una restricción genérica de al menos 3 mSv.

**Tabla 3. Parámetros que caracterizan las prácticas y restricciones de dosis propuestas.**

Práctica	Dosis (mSv)		F	Restricción (mSv)
	Dn	Dp		
MN	2,50	0,10	1,5	4
TT	2,52	No considerada	1,2	3
BBTD	2,50		1,3	4
BATD	2,28		3	
RI-X (RB)	2,00	0,8	1,5	5
RI-X (PC)	3,00			6
RI-G (RB)	3,60	1		7
RI-G (PC)	4,60	0,6		8
Med. Nuc.	0,34	No considerada		

**Tabla 4. Comparación de las restricciones.**

Práctica	Restricción (mSv)			
	Este estudio	Argentina	ARCAL XX	Cuba
MN	4	6	6	6 / 3 <sup>a</sup>
TT	3	5 / 10 <sup>b</sup>	10 <sup>c</sup>	10 <sup>d</sup>
BBTD	4	6		
BATD	3	No definido		
RI-X (RB)	5	No definido	10 <sup>e</sup>	
RI-X (PC)	6			
RI-G (RB)	7			
RI-G (PC)	8			
Med. Nuc.	3	6 <sup>f</sup>	No definido	5

<sup>a</sup> Técnicas "in vivo" / técnicas "in vitro".

<sup>b</sup> <sup>60</sup>Co / Aceleradores.

<sup>c</sup> Radioterapia.

<sup>d</sup> Agrupa la terapia de haces externos (TT) y la BBTD dentro de la práctica de la Radioterapia (CNSN, 2011b).

<sup>e</sup> Agrupa técnicas que emplean fuentes gamma, equipos crawler y emisores de rayos X (CNSN, 2004).

<sup>f</sup> Se incluyen las aplicaciones industriales, excepto RI-X y RI-G.

En la práctica de Radioterapia puede notarse una diferencia apreciable porque la propuesta regional y la propia regulación cubana han combinado en un solo valor (10 mSv) la posible exposición de los trabajadores en las técnicas de TT y la BBTD. Suponiendo que se pretendiera establecer una restricción para un mismo individuo que trabajara en ambas prácticas, la restricción potencial, acorde a la metodología utilizada, sería de 7 mSv, lo cual significa que existen reservas de optimización.

Los valores obtenidos en este trabajo son en todos los casos inferiores a los implementados antes en nuestro país y en los países de nuestra área geográfica. Esto indica que aún existe un margen para optimizar las prácticas estudiadas. Además, se proponen valores específicos para cada práctica, diferenciando entre sus técnicas de aplicación, lo que permitiría realizar comparaciones de las dosis recibidas y estudios de optimización independientes.

#### 4. CONCLUSIONES

1. La evaluación de los datos de la VRI de los TOEs debe acompañarse de la modelación de los escenarios de exposición, para llegar a conclusiones sobre lo que sería un valor de dosis optimizado para la exposición normal.
2. La carga de trabajo real de los trabajadores es muy importante para seleccionar los datos de las dosis por exposiciones normales, pues una carga de trabajo baja necesariamente se refleja en que los valores de exposición que registra la VRI no pueden utilizarse en las es-

timaciones de restricciones. En tales casos, la mejor estimación de la exposición estudiada se puede obtener mediante una simulación de los escenarios normales de exposición.

3. La aplicación de un factor de reserva en la obtención de las restricciones de dosis permite considerar las potenciales desviaciones en los criterios utilizados durante el cálculo, así como proteger los resultados obtenidos y su aplicación por un tiempo lo suficientemente largo como para sacar conclusiones durante su implementación.
4. La metodología propuesta en este trabajo permite obtener valores de restricciones de dosis para la exposición ocupacional, comparables con los obtenidos con otros autores, así como con los reflejados en publicaciones internacionales y con los establecidos por otras Autoridades Reguladoras.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Safety Report Series No. 21. *Optimization of Radiation Protection in the control of occupational exposure*. IAEA, Vienna. (2002).
2. AEN/OCDE. *Considerations on the Concept of Dose Constraint: Report by a Joint Group of Experts from the OECD NEA and the European Commission*, OECD, París. (1996).
3. Arranz, L. y otros. "Proposal of dose constraint values to the patient in diagnostic radiology". *Proceedings of the International Congress on Radiation Protection. IRPA 9. Volume 3*. p. p. 407-409. (1996).
4. Kamenopoulou, V. y otros. "Dose constraints to the individual annual doses of exposed workers in the medical sector". *European Journal of Radiology*. v. **37(3)** p. 204-208. (2001).
5. Kamenopoulou, V. y otros. "Dose constraints to the individual annual doses of exposed workers in nuclear medicine laboratories". *Occupational radiation protection: Protecting workers against exposure to ionizing radiation*. IAEA Contributed papers. p. p. 329-332. (2003).
6. IAEA. "Establishment of source related dose constraints for member of the public. Interim Report for Comment". *IAEA-TECDOC-664*. Viena. (1992).
7. ICRP. "Protection from potential exposure: A conceptual framework". *ICRP Publication 64*. (1993).
8. ICRP. "Protection from Potential Exposures: Application to Selected Radiation Sources", *ICRP Publication 76*. (1996).
9. Hernández, A. y otros. "Utilización del método de árboles de eventos para evaluar la seguridad de instalaciones radiactivas". *Nucleus No. 37*. La Habana. (2005).
10. Hudson A.P. & Shaw J. Memorandum, "Categorisation and Designation of Working Areas in which Unsealed Radioactive Materials are Used", *National Radiological Protection Board, NRPB-M443*. (1993).
11. UNSCEAR (2000). "Sources and effects of ionizing radiation (Report to the General Assembly)", *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)*, UN, Nueva York.