

# Un método para considerar el efecto de los descendientes en el cálculo de la dosis comprometida. Aplicación a la evaluación de bioensayos

Guillermo Sánchez. [gsl@fab.enusa.es](mailto:gsl@fab.enusa.es). ENUSA Industrias Avanzadas, S.A.

**Resumen:** El cálculo de la dosis equivalente comprometida y de la dosis efectiva producida por isótopos incorporados al organismo que generan descendientes también radiactivos requiere tener en cuenta el efecto de estos. Los factores de conversión a dosis (FCD) generalmente incluyen el efecto de los descendientes que más contribuyen. Sin embargo estos FCD están tabulados para un número reducido de condiciones (ej.: valores concretos de AMAD y de  $f_1$ ). En algunos casos, que potencialmente pueden darse, principalmente en situaciones accidentales, puede ser necesario calcular las dosis para parámetros no estándares. En la ponencia se ha desarrollado un método de cálculo de dosis. Se ha incluido en una nueva versión del programa BIODMOD donde el usuario puede calcular las dosis utilizando parámetros no estándares. La versión web del programa se puede ejecutar directamente en el enlace: <http://www3.enusa.es/webMathematica/Public/biodmod.html>.

## Fundamentos

Para poder estimar el riesgo producido por la incorporación de isótopos radiactivos en interior del organismo se utiliza la dosis equivalente comprometida y la dosis efectiva.

La dosis equivalente comprometida  $H_T(\tau)$  se define como la dosis equivalente acumulada que se recibiera en un tejido u órgano T en un periodo  $\tau$ , en años, como consecuencia de las transformaciones nucleares  $U_S$  (en Bq-s) producidas en los órganos o compartimentos fuente S. Supuesto que las emisiones proceden de un único isótopo lo anterior puede expresarse matemáticamente por

$$H_T(\tau) = \sum_R U_S(\tau) SEE(T \leftarrow S) \quad (1)$$

donde

$$U_S(\tau) = \int_0^\tau q(t) dt \quad (2)$$

siendo

$q(t)$  = Actividad, en Bq, el compartimento fuente S en el instante  $t$  tras la incorporación puntual producida en  $t = 0$ .

$SEE(T \leftarrow S)$  = Energía específica efectiva depositada en T como consecuencia de las transformaciones nucleares producidas en S (T y S pueden ser el mismo compartimento). Se expresa en Sv/(Bq s) y se calcula como sigue:

$$SEE(T \leftarrow S) = \frac{1.6 \cdot 10^{-13}}{m_T} \sum_R Y_R E_R w_R AF(T \leftarrow S)_R \quad (3)$$

$Y_R$  = Rendimiento de la radiación R por transformación nuclear ( $Bq s^{-1}$ )

$E_R$  = Energía de la radiación R (MeV/Transformación)

$1.6 \cdot 10^{-13}$  (J/MeV) factor de transformación de MeV en J

$w_R$  = Factor de peso de la radiación R (tabla 8 de la ICRP 68, valores típicos son 20 para partículas alfa y 1 para fotones y electrones)

$AF(T \leftarrow S)_R$  = Fracción absorbida en T por transformación in S para la radiación R

$m_T$  = masa del organo o tejido T (en kg).

La dosis efectiva  $e(\tau)$  referida a un periodo  $\tau$  (50 años para el individuo adulto) es la suma de las dosis equivalentes comprometidas por un factor de peso  $W_T$  específico para cada órgano o tejido. Esto es

$$e(\tau) = \sum_R H_T(\tau) W_T \quad (4)$$

En el caso de trabajadores ocupacionalmente expuestos se consideran los factores de peso para 12 órganos o tejidos específicos, mas un órgano de acumulación que se le asigna un factor de peso de 0.5 o 0.025 (ver ICRP 60)

### **Cálculo de la dosis efectiva considerando el efecto de los descendientes**

Cuando el isótopo referido genera descendientes que a su vez son radiactivos es necesario tenerlos en cuenta en el cálculo de  $e(\tau)$  y  $H_T(\tau)$ . Si se produce más de un descendiente sólo se tienen en cuenta aquellos que puedan alcanzar una actividad significativa de la que genera por el isótopo padre, mientras este permanece en el organismo. La ICRP 30 aplica el criterio de asumir que el isótopo padre y los descendientes considerados siguen la misma biocinética. Hay algunos casos específicos que tienen tratamientos específicos, recogidos en las ICRP 56, 67 y 69. Asimismo el tracto respiratorio es objeto de un tratamiento específico descrito en la ICRP 66.

De acuerdo el criterio de la ICRP 30, que es lo que se hace para la mayoría de los isótopos, se supone que en cada compartimento además del isótopo padre hay una fracción constante de los isótopos descendientes considerados. Es decir, al isótopo o isótopos descendientes se les asigna las mismas desintegraciones acumuladas  $U_s(\tau)$  que al padre, esto ocurre cuando ambos se pueden considerar en equilibrio secular. Por ejemplo: En el caso del U-235, con semiperiodo  $T_R = 7.04 \times 10^6$  años, su descendiente inmediato es el Th-231 con  $T_R = 25.5$  h, y el siguiente el Pa-231 con  $T_R = 3.28 \times 10^4$  años. En un periodo  $\tau = 50$  años, las desintegraciones acumuladas del Th-231 serán prácticamente las mismas que las de su padre el U-235, con el que se encuentra en equilibrio secular. Del Pa-231 la cantidad de desintegraciones será insignificante comparadas con las del U-235 por la que no se considerará. Por tanto la dosis equivalente para el U-235 se calculará como sigue, donde  $U_s$  es idéntica para el U-235 y para el Th-231

$$H_T(\tau) = \sum_R U_S(\tau) SEE_{U-235}(T \leftarrow S) + \sum_R U_S(\tau) SEE_{Th-231}(T \leftarrow S) \quad (5)$$

Para casos más complicados, en los que no se puede asumir la condición de equilibrio secular, la ICRP 30 incluye varias expresiones para determinar  $U_s$  de forma bastante aproximada. En nuestro caso hemos utilizado un método alternativo propio que consiste en:

- Se calcula la función de retención  $r_S(t)$  con  $t$  en días, en el órgano o tejido S, para el isótopo padre, p, para una incorporación unidad de 1 Bq en  $t = 0$ , sin tener en cuenta su desintegración radiactiva.
- Se calcula las desintegraciones producidas en S por el isótopo padre durante un periodo  $\tau$ , en días (normalmente  $\tau = 50 \times 365.25$  días), de acuerdo a la expresión que sigue, donde  $\lambda_{Rp}$  es la constante de desintegración del isótopo padre, en días<sup>-1</sup>.

$$u_{Sp}(\tau) = 24 \times 3600 \int_0^\tau r_S(t) N_p(t) dt \quad \text{donde } N_p(t) = e^{-\lambda_{Rp} t} \quad (6)$$

El factor  $24 \times 3600$  se utiliza para expresar el resultado en Bq-s

- Se calcula las desintegraciones producidas en S por el isótopo hijo usando la expresión

$$u_{Sh}(\tau) = 24 \times 3600 \int_0^\tau r_S(t) N_h(t) dt \quad \text{donde } N_h(t) = \lambda_p \frac{e^{-\lambda_h t} - e^{-\lambda_p t}}{\lambda_p - \lambda_h} \quad (7)$$

El procedimiento anterior lo hemos integrado en el programa BIOKMOD (Sánchez 2005 y 2007) como un modulo específico. BIOKMOD calcula las expresiones analíticas las funciones de retención  $r_s(t)$  para la mayoría de los elementos, aplicando los modelos biocinéticos vigentes de las ICRP. El factor de dosis equivalente FDH comprometida (dosis estimada por cada Bq incorporado) será por tanto

$$FDH_T(\tau) = \sum_R u_{Sp}(\tau) SEE_p(T \leftarrow S) + \sum_R u_{Sh}(\tau) SEE_h(T \leftarrow S) \quad (8)$$

BIOKMOD incluye los factores FDH para algunos isótopos. Los factores de SEE se han obtenido con DCAL (desarrollado por K. Eckerman et al, que se puede descargar de <http://ordose.ornl.gov/downloads.html>). Para aquellos isótopos para los BIOKMOD no da directamente las dosis, se han incluido una función específica que permite importar directamente los factores SEE de DCAL y utilizar los  $U_S$  calculados por BIOKMOD. De esta forma se puede calcular los factores de conversión a dosis para la práctica totalidad de los isótopos

## APLICACIÓN

Un ejemplo típico donde es necesario tener en consideración al hijo es la cadena siguiente, donde el Zr-90 es estable.



La dosis equivalente comprometida y la dosis efectiva del Sr 90 calculada según el procedimiento anterior se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.-** Factores de conversión a dosis (Sv/Bq) para el SR 90 por inhalación para un adulto varón ocupacionalmente expuesto, metabolismo S y AMAD 5  $\mu\text{m}$  (sólo se muestran los órganos que mas contribuyen)

	BIOKMOD	ICRP 2001	Diferencia
Testes	2.34E-11	2.4E-11	-2.6%
Red Marrow	6.02E-09	6.0E-09	0.4%
Colon	8.22E-09	8.2E-09	0.3%
Lungs	6.25E-07	6.3E-07	-0.8%
St Wall	1.95E-10	1.9E-10	2.4%
Bone Surface	1.36E-08	1.4E-08	-3.0%
Small intestine	4.92E-10	4.9E-10	0.4%
Extrathoracic airways	9.10E-08	9.1E-08	0.0%
<b>Effective, e(50)</b>	<b>7.69E-08</b>	<b>7.7E-08</b>	<b>-0.1%</b>

Se puede observar que las diferencias son muy pequeñas, y en parte atribuibles a que la ICRP 2001 utiliza una sola cifra decimal. La comparación anterior se incluye únicamente a efectos de contraste con los valores oficiales dados por la ICRP 2001. En casos estándar, se deben usar los factores de conversión “oficiales” de la ICRP. Sin embargo hay situaciones donde puede ser necesario calcular las dosis usando parámetros específicos como se muestra en el ejemplo que sigue.

**Ejemplo:** Un operario ha incorporado accidentalmente una cantidad desconocida  $I$  de  ${}^{60}\text{Co}$  en forma de metal y de óxido. Con posterioridad ha sido sometido a un programa de bioensayos consistente en realizar medidas con un contador de cuerpo entero (CCE) y de excreción urinaria.

Los datos se muestran en la tabla siguiente. Debe asumirse que las medidas siguen una distribución lognormal con desviación estándar geométrica de 1.07 Bq, para las determinaciones con el CCE y 1.8 Bq/día para la excreción urinaria (Caso propuesto en Draft Guidance Document on Interpretation of Bioassay Data – 21 February 2007. ANNEX B).

**Tabla 2.-** Resultados de los bioensayos tras la inhalación accidental de  $^{60}\text{Co}$

Días desde la incorporación	Excreción urinaria-24h (Bq $^{60}\text{Co}/\text{d}$ )	Retención cuerpo entero (Bq de $^{60}\text{Co}$ )	Días desde la incorporación	Excreción urinaria-24h (Bq $^{60}\text{Co}/\text{d}$ )	Retención cuerpo entero (Bq de $^{60}\text{Co}$ )
10		$2.39 \cdot 10^4$	60	37	$2.16 \cdot 10^4$
14	709	$2.92 \cdot 10^4$	80	29	$1.75 \cdot 10^4$
17		$2.01 \cdot 10^4$	190	11	$1.16 \cdot 10^4$
20		$1.82 \cdot 10^4$	370	1.7	$8.1 \cdot 10^3$
27	64	$2.16 \cdot 10^4$	747		$4.8 \cdot 10^3$
40	71	$1.98 \cdot 10^4$	1010		$2.7 \cdot 10^3$

Evaluación: Asumiendo que  $I$  el AMAD  $p$  así como los factores asociados a la forma química ( $s_p$ ,  $s_{pt}$ ,  $s_t$  y  $f_1$ ) son desconocidos se ha realizado un ajuste los bioensayos dejando como parámetros a ajustar:  $\{I, p, s_p, s_{pt}, s_t, f_1\}$ . Se obtiene que el mejor ajuste (Sánchez 2007) corresponde que a aquellos valores de los parámetros que minimizan la  $\chi^2$  donde

$$\chi^2 : \text{Min} \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(\ln[I r_{C,j}(t_i, p, s_p, s_{pt}, s_t, f_1)] - \ln[m_i])^2}{\ln(SG_C)} \right], \quad (9)$$

donde:  $r(t_i)$  son las funciones de retención para el bioensayo tipo C y  $m_i$  los resultados de las determinaciones en los instantes  $t_i$ . SG desviaciones estándar geométrica correspondiente (en nuestro caso: 1.07 Bq, para las determinaciones con el CCE y 1.8 Bq/día )

Así se ha obtenido que el mejor ajuste es:  $\{I \rightarrow 398553, p \rightarrow 5.5, s_p \rightarrow 10, s_{pt} \rightarrow 90, s_t \rightarrow 0.0007\}$  para el  $\chi^2 \rightarrow 15$ .

Utilizando los parámetros específicos se obtiene una dosis efectiva de 4.5 mSv.

## Referencias

ICRP: La siguiente referencia recopila la información de la mayoría de las ICRP que se referencia en el texto: International Commission on Radiological Protection. ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public. Version 2.0.1 (CD-ROM), Oxford: Pergamon Press; 2001.

Sánchez G; "Fitting bioassay data and performing uncertainty analysis with BIOKMOD" Health Physics. 92(1) :64-72. 2007. ISSN/ISBN: 0017-9078 (requirió la comparación con 6 programas, incluyendo IMBA, en el artículo se destacan aquellos aspecto novedosos en BIOKMOD)

Sánchez G; Biokmod: A Mathematica toolbox for modeling Biokinetic Systems". Mathematica in Education and Research: 10 (2) 2005. ISSN/ISBN: 1096-3324