

EFECTO DE LOS FACTORES DE CONVERSIÓN DE ICRP 116 SOBRE LAS DOSIS CALCULADAS PARA LOS ATI DE ALMARAZ, COFRENTES Y TRILLO



JOSÉ LUIS CORMENZANA

Ingeniero de Protección Radiológica
EMPRESARIOS AGRUPADOS - GHESA



BEATRIZ LAMELA PASCUA

Combustible gastado y ATIS
IBERDROLA GENERACIÓN NUCLEAR



ALBERTO LÓPEZ POZO

Ingeniería civil y estructuras
CENTRALES NUCLEARES ALMARAZ
TRILLO (CNAT)



BELÉN MARTÍNEZ CARMONA

Ingeniera de Protección Radiológica
EMPRESARIOS AGRUPADOS - GHESA

INTRODUCCIÓN

En el periodo 2015-2021 se realizaron los cálculos radiológicos utilizados como soporte para el licenciamiento de los Almacenes Temporales Individualizados (ATI) de C.N. Almaraz (ATI-20), C.N. Cofrentes (ATI-24) y C.N. Trillo (ZY4). En los cálculos se usaron los factores de conversión de flujo de partículas a tasa de dosis efectiva de la publicación ICRP 74 [1], coherentes con el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes de 2001 [2] vigente en el momento de la realización de los cálculos.

Los tres ATI utilizan contenedores metálicos de almacenamiento y transporte de diferentes modelos: DPT, ENUN 32P y HI-STAR-150. En los ATI de C.N. Cofrentes y C.N. Almaraz los contenedores se almacenan sobre losas a la intemperie mientras que en el ATI de C.N. Trillo se almacenan dentro de un edificio de hormigón que proporciona un blindaje considerable.

En 2022 se publicó el nuevo Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes [3], que requiere que los cálculos de exposición externa sigan la metodología recogida en la publicación ICRP 116 [4].

Para conocer el efecto sobre las tasas de dosis originadas por los tres ATI citados del uso de los factores de conversión de flujo de partículas a tasa de dosis efectiva de la publicación ICRP 116, se han modificado los modelos de MAVRIC [5] utilizados en los cálculos radiológicos de licencia del ATI-24 para incluir los nuevos factores y se han realizado nuevos cálculos. Los resultados obtenidos se han comparado con los obtenidos usando los factores de la publicación ICRP 74 [1].

MAVRIC es un código de transporte de radiación que usa el método de Monte Carlo y los resultados obtenidos están afectados por una cierta incertidumbre. Cuando se comparan los resultados de dos cálculos diferentes se considera que las diferencias no son significativas si son del mismo orden que las incertidumbres en los resultados.

FACTORES DE PASO A TASA DE DOSIS

Las **Figuras 1 y 2** presentan los factores de conversión de flujo de partículas a tasa de dosis efectiva de las publicaciones ICRP 74 e ICRP 116 para fotones y neutrones, respectivamente. Los factores de las dos publicaciones son muy similares para los fotones de todas las energías. Los factores de conversión para neutrones de ICRP 116

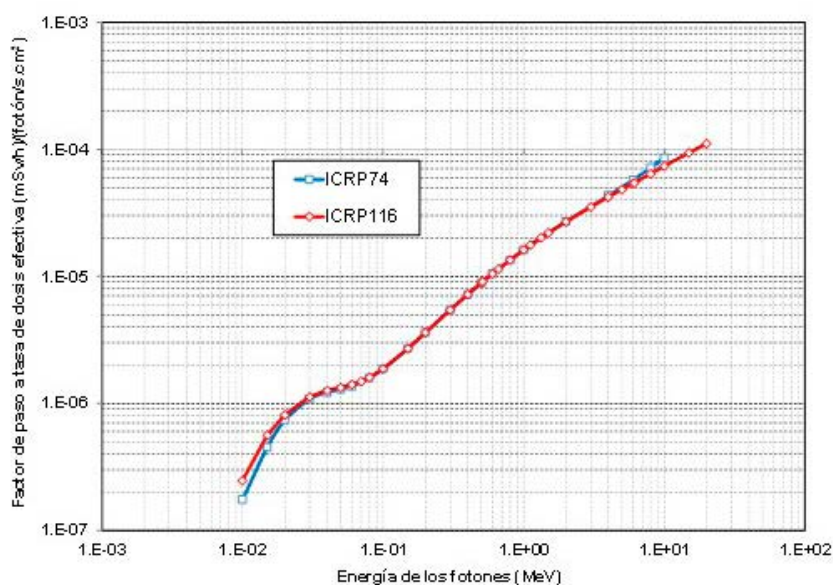


Figura 1. Factores de conversión de flujo de fotones a tasa de dosis efectiva de ICRP 74 e ICRP 116.

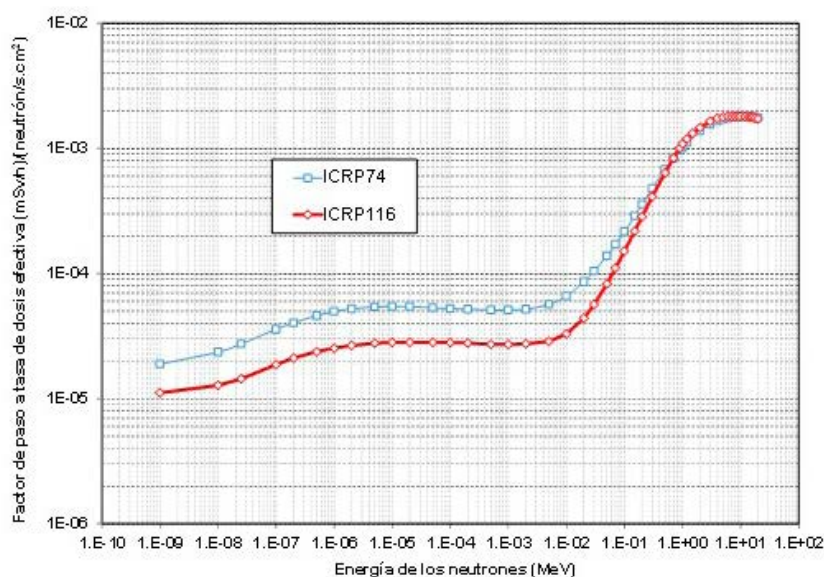


Figura 2. Factores de conversión de flujo de neutrones a tasa de dosis efectiva de ICRP 74 e ICRP 116.

son entre un 50% y 60% de los factores de ICRP 74 para energías hasta 0,05 MeV. Para neutrones de energía superior a 0,05 MeV la diferencia entre los factores de ambas publicaciones disminuye al aumentar la energía y para neutrones de energía superior a 0,5 MeV los factores de ambas publicaciones son prácticamente iguales.

Según las **Figuras 1 y 2**, previsiblemente el uso de los factores de conversión de flujo de partículas a tasa de dosis efectiva de la publicación ICRP 116 dará lugar a una reducción significativa de las tasas de dosis por neutrones originadas por los ATI respecto a las obtenidas en los cálculos de licencia (con los factores ICRP 74). Por el contrario, es de esperar que las tasas de dosis gamma se vean muy poco afectadas por el uso de los factores de la publicación ICRP 116.

MODELOS DE LOS CONTENEDORES Y LOS ATI

Los cálculos se realizan con los modelos detallados de los contenedores (ENUN 32P en el ATI-20, HI-STAR 150 en el ATI-24 y DPT y ENUN 32P en el ZY4) y los ATI desarrollados para los cálculos de licencia. La **Figura 3** muestra los modelos de los tres contenedores desarrollados con MAVRIC.

Los cálculos para el ATI-20 se realizan para el almacén lleno con 20 contenedores ENUN-32P (con tapa adicional de blindaje neutrónico), 6 con bastidor tipo B y 14 con bastidor tipo C. Los cálculos del ATI-24 se realizan con 17 contenedores HI-STAR 150 almacenados, porque es el número máximo de contenedores previsto para el ATI-24 antes de empezar a utilizar el nuevo ATI-100, que utiliza el sistema de almacenamiento HI-STORM FW. Los cálculos

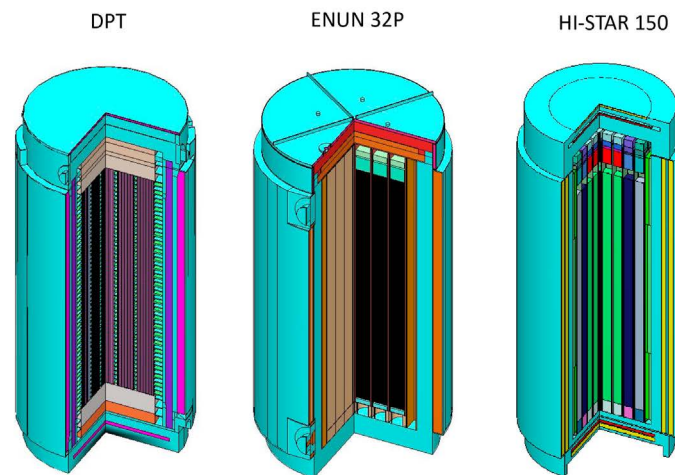


Figura 3. Modelos de los contenedores DPT, ENUN 32P y HI-STAR 150.

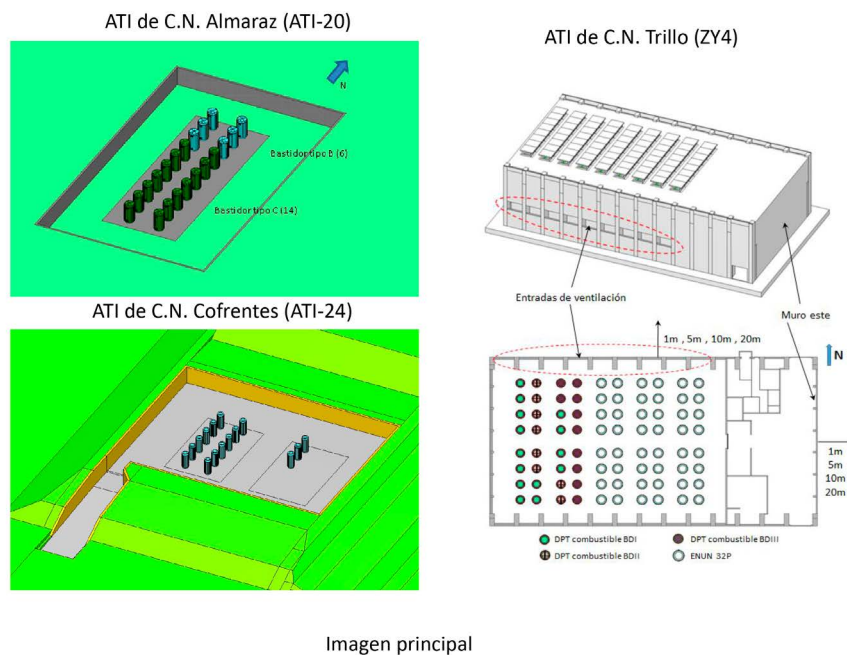


Imagen principal

Figura 4. Modelos de los ATI utilizados en los cálculos.

para el ZY4 se realizan para el almacén lleno con 32 contenedores DPT y 48 contenedores ENUN 32P (sin tapa adicional de blindaje neutrónico). Los modelos de los 3 ATI se muestran en la **Figura 4**.

RESULTADOS PARA EL ATI DE CN ALMARAZ (ATI-20)

Para el ATI-20 se calculan las tasas de dosis en 4 puntos del vallado de propiedad situados a unos 320 m de distancia al centro de la losa de almacenamiento, y que se denominan 55°, 60°, 65,32° (orientación en que la distancia del vallado al centro de la losa es mínima) y 70°.

La **Tabla 1** muestra la variación de las tasas de dosis efectivas calculadas con los factores de ICRP 116 respecto a las obtenidas con los factores de ICRP 74. Se observa que las tasas de dosis por neutrones bajan aproximadamente un 30% al usar los factores de ICRP 116, mientras que todas las tasas de dosis gamma (gamma secundarias, gammas del combustible y Co60) presentan variaciones del orden de la incertidumbre en los resultados, y por tanto se consideran no significativas. El uso de los factores de ICRP 116 origina aproximadamente un 20% de bajada en la tasa de dosis total.

Punto	Neutrones	Gammas secundarias	Gammas del combustible	Co60	Total
55°	-30.96%	-4.45%	-1.16%	-4.16%	-20.39%
60°	-28.99%	4.79%	-3.04%	-0.45%	-17.72%
65,32°	-30.27%	-6.50%	-4.08%	-1.09%	-20.37%
70°	-32.71%	7.45%	0.89%	-0.59%	-20.08%
Promedio	-30.73%	0.32%	-1.85%	-1.57%	-19.64%

Tabla 1. Variación de las tasas de dosis efectiva originadas por el ATI-20 al usar los factores de conversión de la publicación ICRP 116: $(TD_{ICRP\ 116} - TD_{ICRP\ 74}) / TD_{ICRP\ 74}$

RESULTADOS PARA EL ATI DE CN COFRENTES (ATI-24)

La **Tabla 2** identifica los 4 puntos en que se calculan las tasas de dosis originadas por el ATI-24. El punto PD13 es el único situado a una altura superior al borde del muro perimetral del ATI-24 y, por tanto, el único con visión directa de los contenedores almacenados.

La **Tabla 3** muestra la variación de las tasas de dosis efectivas calculadas con los factores de ICRP 116 respecto a las obtenidas con los factores de ICRP 74. Se observa que las tasas de dosis gamma (gammas secundarias, gammas del combustible y Co60) apenas cambian. En el punto PD1 la tasa de dosis por neutrones baja aproximadamente un 32,1% al usar los factores de ICRP 116 mientras que el punto PD13

la tasa de dosis por neutrones baja un 27,5%. El diferente comportamiento se debe a que el punto PD13 tiene visión directa de los contenedores almacenados mientras que el punto PD1 no la tiene.

RESULTADOS PARA EL ATI DE CN TRILLO (ZY4)

Para el ZY4 se calculan las tasas de dosis frente al muro norte y frente al muro este usando factores de ICRP 116 e ICRP 74. En ambos casos se calculan las tasas de dosis a 1 m, 5 m, 10 m y 20 m de la cara externa del muro del ATI. Los puntos situados frente al muro norte reciben la radiación que atraviesa el muro norte y la radiación que sale a través de las entradas de ventilación, mientras que los puntos situados frente al muro este sólo reciben radiación que atraviesa dicho muro.

Punto	Descripción	Altura sobre el borde al muro del ATI-24 (m)	Distancia al centro del ATI-24 (m)
PD1	Vallado de PR zona norte frente al centro de las losas del ATI-24	-2.57	50
PD13	Torre de alta tensión a 10 m de altura	16.49	86
D1	Punto de la Vereda de Alcola (límite de área controlada)	-15.50	147
D5	Punto de la Vereda de Alcola (límite de área controlada)	-2.50	218

Tabla 2. Puntos alrededor del ATI-24 en que se calculan las tasas de dosis originadas por el ATI-24.

Punto	Neutrones	Gammas secundarias	Gammas del combustible	Co60	Total
PD1	-32.07%	0.66%	-0.42%	-0.22%	-27.50%
PD13	-27.53%	0.42%	-0.43%	0.49%	-18.39%
D1	-30.31%	0.31%	0.42%	-1.32%	-24.57%
D5	-29.83%	-2.14%	0.61%	-0.79%	-23.50%
Promedio	-30.07%	-0.91%	0.51%	-1.06%	-24.03%

Tabla 3. Variación de las tasas de dosis efectiva originadas por el ATI-24 al usar los factores de conversión de la publicación ICRP 116: $(TD_{ICRP\ 116} - TD_{ICRP\ 74}) / TD_{ICRP\ 74}$

Distancia	Neutrones		Gammas secundarias		Gamma del combustible y Co60*		Total	
	Norte	Este	Norte	Este	Norte	Este	Norte	Este
1 m	-43.81%	-45.95%	-3.23%	0.86%	-3.46%	0.14%	-24.78%	-28.29%
5 m	-44.33%	-45.13%	-9.87%	-3.41%	-6.79%	-1.72%	-31.07%	-29.59%
10 m	-44.64%	-47.11%	3.22%	2.32%	-1.86%	0.34%	-27.13%	-27.09%
20 m	-46.30%	-44.81%	-1.03%	-17.23%	-2.32%	2.53%	-28.05%	-28.46%
Promedio	-44.77%	-45.75%	-2.73%	-4.37%	-3.61%	0.32%	-27.76%	-28.36%

Tabla 4. Variación de las tasas de dosis efectiva originadas por el ZY4 al usar los factores de conversión de la publicación ICRP 116: $(TD_{ICRP\ 116} - TD_{ICRP\ 74}) / TD_{ICRP\ 74}$ * Se presentan los resultados para la suma de las dos contribuciones porque así se hizo en los cálculos radiológicos de licencia del ZY4.

La **Tabla 4** muestra el cociente entre las tasas de dosis efectivas calculadas con los factores de ICRP 116 y con los factores de ICRP 74. En los 8 puntos de cálculo las tasas de dosis por neutrones bajan aproximadamente un 45% al usar los factores de ICRP 116, mientras que las tasas de dosis gamma (gamma secundarias, gammas del combustible y Co60) cambian poco, excepto en dos valores de la tasa dosis por la radiación gamma secundaria afectados por una incertidumbre elevada. El uso de los factores de ICRP 116 origina aproximadamente un 28% de bajada en la tasa de dosis total. El efecto de los factores de ICRP 116 es similar en todos los puntos de cálculo y frente ambos muros.

ESPECTRO DE NEUTRONES EN LOS PUNTOS DE CÁLCULO

La **Figura 5** muestra los espectros de los neutrones procedentes del ATI-20 y el ZY4 que llegan a los puntos de cálculo en el vallado de propiedad de C.N. Almaraz y a 1 m de distancia a los muros este y norte del ATI de C.N. Trillo. Se observa que los espectros obtenidos en los cálculos del ATI de C.N. Trillo son mucho menos energéticos que los obtenidos para el ATI de C.N. Almaraz.

Para el ATI de C.N. Trillo aproximadamente el 99,5% de los neutrones que llegan a los puntos de cálculo situados a 1 m de los muros tienen una energía inferior a 0,05 MeV, y como se indica en la sección "factores de paso a tasa de dosis" para todos ellos los factores de conversión a tasa de dosis efectiva de ICRP 116 son entre un 50% y 60% los factores de ICRP 74. En los cálculos realizados las tasas de dosis por neutrones con los factores de ICRP 116 son aproximadamente un 55% de las tasas de dosis obtenidas con los factores de ICRP 74, lo cual es coherente con las diferencias en los factores de conversión.

Para el ATI de C.N. Almaraz aproximadamente un 11% de los neutrones que llegan a los puntos de cálculo en el vallado de propiedad tienen una energía superior a 0,05 MeV. Para estos fotones las diferencias entre los factores de conversión de ICRP 116 e ICRP 74 son menores, y el valor de los factores de conversión es mayor, que para los fotones de energía inferior a 0,05 MeV. Estos neutrones de mayor energía son responsables de que para C.N. Almaraz solo haya un 30% de diferencia entre las tasas de dosis por neutrones calculadas con los factores de ICRP 116 e ICRP 74.

La **Figura 6** muestra los espectros de los neutrones que llegan a los 4 puntos de cálculo alrededor del ATI-24 de C.N.

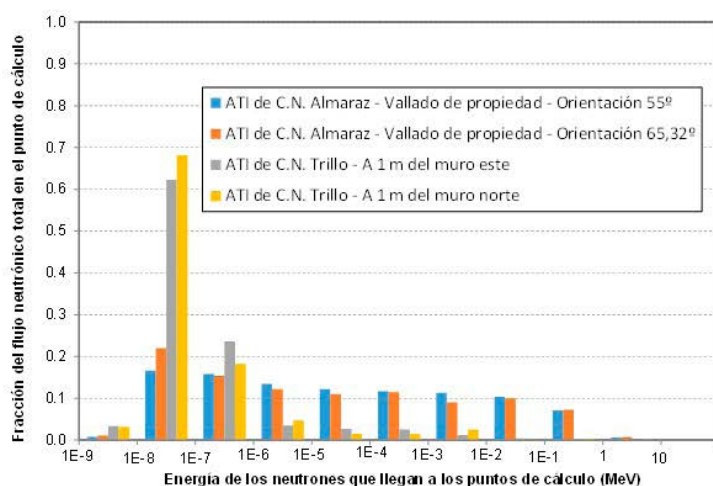


Figura 5. Espectros de los neutrones que llegan a los puntos de cálculo de los ATI de C.N. Almaraz y C.N. Trillo.

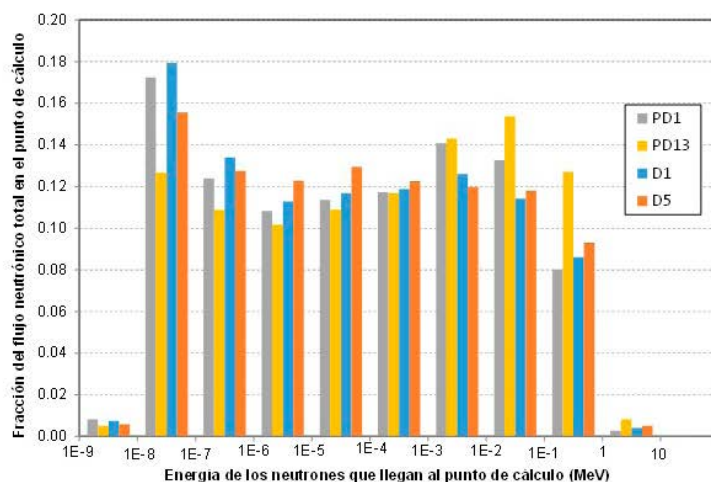


Figura 6. Espectros de los neutrones que llegan a los puntos de cálculo en las proximidades del ATI-24 (PD1 y PD13) y en la Vereda de Alcola (D1 y D5).

Punto	Porcentaje
PD1	88,4%
PD13	82,0%
D1	87,5%
D5	86,4%

Tabla 5. Porcentaje de los neutrones que llegan a cada punto de cálculo procedentes del ATI-24 que tienen energía inferior a 0,05 MeV.

Cofrentes. Se observa que a PD13 (el único con visión directa de los contenedores almacenados) llegan más neutrones de las energías más elevadas que a los otros puntos.

La **Tabla 5** presenta el porcentaje de los neutrones que llegan a cada punto que tienen una energía inferior a 0,05 MeV. En los puntos sin visión directa de los contenedores los valores son similares: 88,4% (PD1), 87,5% (D1) y 86,4% (D5). En el punto PD13, situado a mayor altura que el ATI-24 y con visión directa de los contenedores almacenados, el porcentaje es 82,0%. Como se indica en la sección "factores de paso a tasa de dosis" para los neutrones con energía inferior a 0,05 MeV los factores de conversión a tasa de dosis efectiva de ICRP 116 son entre un 50% y 60% los factores de ICRP 74. Esto explica la bajada de las tasas de dosis por neutrones al usar los factores de ICRP 116, y que esta bajada sea menor en el punto al que llegan los neutrones con un espectro más energético (PD13).

CONCLUSIONES

Las tasas de dosis efectiva gamma originadas por los ATI actualmente en operación en C.N. Almaraz (ATI-20), C.N. Cofrentes (ATI-24) y C.N. Trillo (ZY4) no cambian de manera significativa al usar los nuevos factores de ICRP 116. Este comportamiento se observa para todas las contribuciones a la tasa de dosis gamma total: fuente gamma del combustible, fuente de Co60 y gammas secundarias.

Por el contrario, las tasas de dosis efectiva por neutrones sufren una bajada importante al usar los factores de ICRP

116, del orden del 30% para los ATI en que los contenedores se almacenan a la intemperie (ATI-20 y ATI-24) y del 45% para el ATI con edificio (ZY4). La mayor bajada de las tasas de dosis por neutrones para el ZY4 es consecuencia del espectro menos energético de los neutrones que llegan a los puntos de cálculo. Esto se debe a que en este caso los neutrones deben atravesar los muros de hormigón del edificio además del cuerpo y las tapas de los contenedores.

Debido a la importante contribución de los neutrones a la tasa de dosis efectiva total, al usar los factores de ICRP 116 éstas bajan aproximadamente un 20% para el ATI-20, un 24% para el ATI-24 y un 28% para el ZY4 respecto a las obtenidas usando los factores de ICRP 74.

Por tanto, si en el futuro es necesario realizar nuevos cálculos radiológicos para alguno de los tres ATI citados, el uso de los nuevos factores de conversión a tasa de dosis efectiva de la publicación ICRP 116 se traducirá en una bajada importante de las tasas de dosis efectivas respecto a las obtenidas en los cálculos de licencia.

REFERENCIAS

- [1] ICRP, 1996. *Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation*. ICRP Publication 74.1996.
- [2] Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes. Real Decreto 783/2001, de 6 de julio de 2001.
- [3] Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes. Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre de 2022.
- [4] ICRP, 2010. *Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures*. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5).
- [5] Oak Ridge National Laboratory, Scale: *A comprehensive modeling and simulations suite for nuclear analysis and design Version 6.1*, ORNL/TM-2005/39, June 2011. ■