

# IMPACTO DE LA ACTUALIZACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE DOSIS DEL NUEVO REGLAMENTO DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA



**BELÉN MARTÍNEZ CARMONA**

Ingeniera de la Sección de Protección Radiológica EMPRESARIOS AGRUPADOS - GHESA (EAG)



**MIRIAM VÁZQUEZ ANTOLÍN**

Ingeniera de la Sección de Protección Radiológica (EAG)



**ÁNGELA CORTÉS MARTÍN**

Jefa de la Sección de Protección Radiológica (EAG)

## INTRODUCCIÓN

El 6 de julio de 2001 se publicó, a través del Real Decreto (RD) 783/2001, el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes (RPSRI) que ha estado vigente durante 22 años y que ha marcado la actividad del sector de la protección radiológica durante todo ese tiempo. Con este RPSRI se transpuso la Directiva 96/29/EURATOM que estaba basada en los criterios recomendados por la comisión de 1990 de la ICRP, en particular, en la ICRP 60 [1].

En 2007, a través de la publicación de la ICRP 103 [2], se emitieron nuevas recomendaciones que sustituyeron a las de la ICRP 60. Estas nuevas recomendaciones han supuesto la actualización de los factores de ponderación de la radiación y de tejido para la dosis equivalente y la dosis efectiva.

Las recomendaciones de 2007 de la ICRP han motivado la aprobación de la Directiva 2013/59/EURATOM, y la publicación de los coeficientes de conversión para la estimación de dosis por exposición externa en la ICRP 144 [3] y en la ICRP 116 [4].

Con el objetivo de incorporar al ordenamiento jurídico español la Directiva 2013/59/EURATOM, el 20 de diciembre de 2022 se publicó el RD 1029/2022 por el que se aprueba el nuevo Reglamento sobre protección para la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes (RPSI). Este nuevo reglamento deroga la normativa anterior e introduce cambios de distinta índole (reducción del límite de dosis equivalente para el cristalino en exposición ocupacional, nuevas consideraciones sobre la protección

frente a la exposición a la radiación natural y eliminación del promedio de cinco años para el cumplimiento de los límites de dosis para trabajadores expuestos, entre otros). En cuanto a la exposición externa, el RPSI tiene en cuenta la ICRP 103 [2], por lo que, asociado al nuevo RD, en la resolución del 17 de enero de 2023, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) establece nuevos coeficientes de dosis por exposición externa de acuerdo con la ICRP 144 y la ICRP 116.

El objeto de este trabajo es evaluar el impacto de la actualización de los coeficientes de dosis en los análisis radiológicos que se realizan en la Sección de Protección Radiológica de Empresarios Agrupados-GHESA (EAG).

Por un lado, se analiza el cambio en los coeficientes de dosis efectiva y a la piel por exposición externa de la ICRP 144 respecto a los empleados anteriormente y el impacto de este cambio en cálculos de dosis en operación normal y accidente. Asimismo, se evalúan las diferencias entre los coeficientes de dosis equivalente a la piel entre los distintos sexos.

Por otro lado, se evalúa el efecto de la utilización de los nuevos coeficientes recomendados de dosis efectiva dependientes de la energía para distintos tipos de partículas y ángulos de incidencia, recogidos en la ICRP 116. En particular, se analizan los coeficientes de dosis para neutrones y fotones que se utilizan para calcular las tasas de dosis por irradiación mediante los códigos de transporte de radiación.

A la fecha de la publicación del presente trabajo, los coeficientes de dosis por exposición interna no han sido

publicados por el CSN. Por este motivo, los análisis y conclusiones que se presentan se centran únicamente en los coeficientes de dosis por exposición externa.

## COEFICIENTES DE DOSIS EFECTIVA Y DOSIS EQUIVALENTE A LA PIEL POR EXPOSICIÓN EXTERNA

### Publicación 144 de la ICRP

Con la publicación de la ICRP 144, se han establecido, por primera vez, los coeficientes de tasa de dosis efectiva y tasa de dosis equivalente a distintos órganos por exposición externa a través de tres vías: contaminación en suelo, exposición a la nube e inmersión en agua. Estos coeficientes se calculan, tanto para fuentes de fotones, como de electrones, y se expresan en unidades de tasa de dosis por unidad de actividad en una superficie o en un volumen ( $\text{nSv h}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^2$  o  $\text{nSv h}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^3$ ). La ICRP 144 incluye diferentes tablas que recogen los coeficientes de dosis para varios grupos de edad (recién nacido, 1 año, 5 años, 10 años, 15 años y adulto, **Figura 1**) y para un total de 1.252 radionucleidos.

Los datos muestran que, en general, cuanto menor es la masa corporal, mayor es el coeficiente de dosis. Esto se debe, fundamentalmente, a dos motivos: por un lado, existe una mayor proximidad a la fuente (en el caso de contaminación en suelo) y, por otro lado, los individuos más jóvenes y, por tanto, con menor masa corporal, presentan un menor blindaje de los órganos internos frente a la radiación.

### Coeficientes de dosis equivalente: distinción entre ambos sexos

Una particularidad de los nuevos coeficientes de dosis es que, para el caso de la tasa dosis equivalente a distintos órganos, la ICRP 144 hace una distinción entre sexos, de manera que la persona de referencia puede ser hombre o mujer.

Se han analizado las diferencias entre los coeficientes de dosis equivalente a la piel de ambos sexos para el individuo adulto (mayor de 17 años), considerando las tres posibles vías de exposición. Se selecciona la piel como órgano, puesto que la dosis equivalente a la piel es una magnitud dosimétrica de uso frecuente. Las conclusiones de este análisis son las siguientes:

- Para la vía de exposición a suelo contaminado, los coeficientes de dosis equivalente a la piel en la mujer son mayores que los del hombre en el 98% de los radionucleidos de la ICRP 144. Para el 2% restante el valor de los coeficientes es igual en hombres y en mujeres. La diferencia máxima entre ambos coeficientes es del 3%.

- Para la vía de exposición a la nube radiactiva, los coeficientes de dosis equivalente a la piel en el hombre son mayores que los de la mujer en el 48% de los radionucleidos de la ICRP 144. Para el 13% de los radionucleidos el valor de los coeficientes es igual en ambos sexos y en el 39% restante, el coeficiente para la mujer es mayor que para el hombre. La diferencia máxima entre ambos coeficientes es del 4%.

- Para la vía de exposición de inmersión en agua, los coeficientes de dosis efectiva a la piel en la mujer son mayores que en el hombre para el 82% de radionucleidos de la ICRP 144. Para el 10% de los radionucleidos el valor de los coeficientes es igual en ambos sexos y, en el 8% restante, el coeficiente para el hombre es mayor que para la mujer. La diferencia máxima entre ambos coeficientes es del 5%.

### Impacto en el cálculo de dosis al exterior en operación normal

En la Sección de Protección Radiológica de Empresarios Agrupados se realizan cálculos de dosis por efluentes radiactivos líquidos y gaseosos liberados en operación normal siguiendo la metodología descrita en la Regulatory Guide (RG) 1.109 [5].

Hasta la publicación de los nuevos coeficientes de dosis por

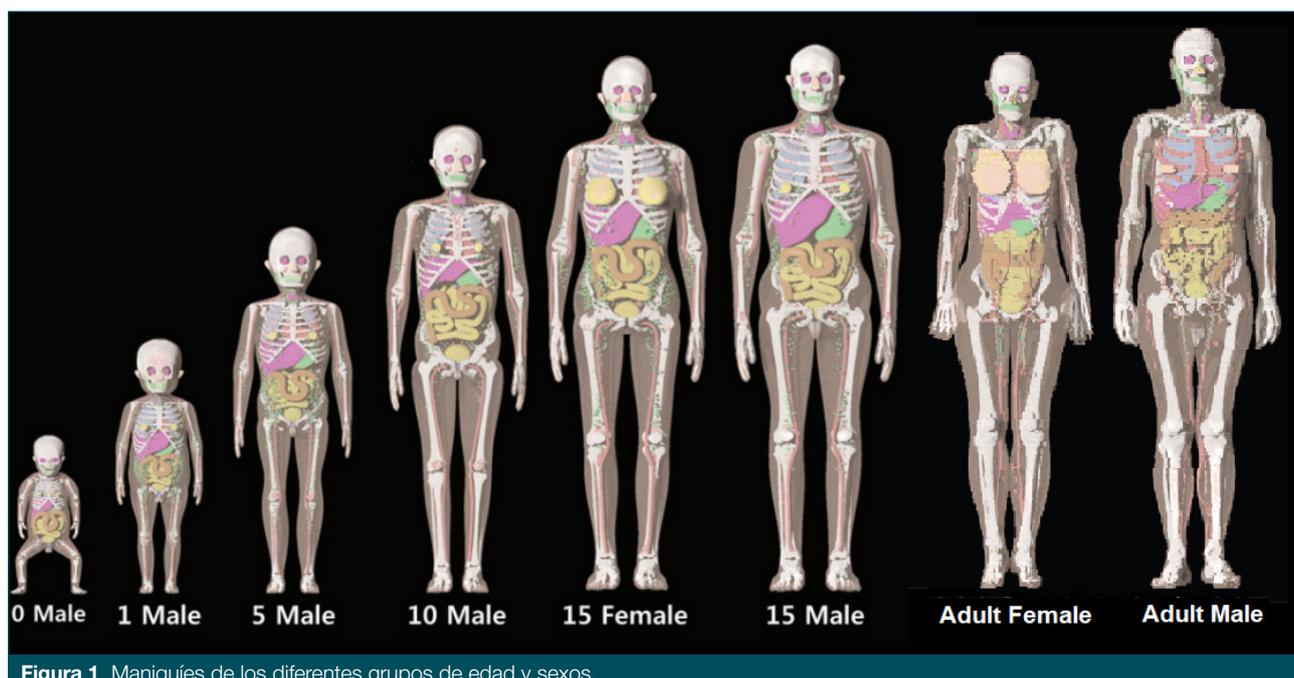


Figura 1. Maniqués de los diferentes grupos de edad y sexos.

exposición externa, en este tipo de cálculos para centrales de tecnología americana, se han empleado los coeficientes de dosis recogidos en el Federal Guidance Report 13 (FGR) [6] publicado por la EPA. En el caso de los coeficientes de dosis a la piel por exposición a la nube para gases nobles, se utilizan los coeficientes recogidos dentro de la RG 1.109.

Con el objetivo de analizar el impacto de la actualización de los coeficientes sobre las dosis en operación normal que recibiría el individuo adulto, se ha tomado el listado de isótopos mínimo recogido en la Guía de Seguridad 1.4 [7] del CSN, tanto para efluentes líquidos como para efluentes gaseosos. Partiendo de ese conjunto de isótopos y normalizando la actividad a 1 Bq, se han calculado las dosis utilizando los coeficientes empleados hasta ahora (FGR y RG 1.109) y se han comparado con las dosis resultantes al emplear los nuevos coeficientes de la ICRP 144. De todas las vías de exposición que se indican en RG 1.109, el análisis de las dosis se ciñe a las vías de exposición externa ya que son las únicas que ven afectadas por el cambio de coeficientes.

La **Tabla 1** muestra el porcentaje de diferencia en la dosis efectiva calculada con los coeficientes de dosis del FGR frente a la calculada con los coeficientes de dosis de la ICRP 144 para las distintas vías de exposición externa en operación normal.

Del mismo modo, la **Tabla 2** recoge el porcentaje de diferencia entre las dosis equivalentes a la piel calculadas con los coeficientes de dosis del FGR y de la RG 1.109 frente a los nuevos coeficientes para las tres vías de exposición externa. Adicionalmente, se ha añadido una columna que compara las dosis equivalentes a la piel que recibiría el hombre de referencia y la mujer de referencia.

Como se muestra en la **Tabla 1** y la **Tabla 2**, la dosis efectiva y la dosis equivalente a la piel disminuyen al emplear

los coeficientes de dosis de la ICRP 144. Esta disminución es más significativa para las vías de exposición a suelos contaminados y depósitos en orillas. Con respecto a la comparativa entre ambos sexos, los resultados muestran que las dosis equivalentes a la piel por exposición a la nube radiactiva son mayores en hombres que en mujeres. Por el contrario, para las vías de exposición a suelo contaminado y depósitos en orilla, las dosis equivalentes a la piel en las mujeres son mayores que en los hombres.

### Impacto en el cálculo de dosis en accidente

Otra de las actividades que se llevan a cabo desde la Sección de Protección Radiológica de Empresarios Agrupados consiste en el cálculo de dosis por emisiones radiactivas liberadas en caso de accidente. Para este tipo de cálculos se emplea la metodología descrita en la RG 1.195 [8] y la RG 1.183 [9]. Al igual que en el caso de operación normal, hasta la publicación de los nuevos coeficientes de dosis, se han empleado los coeficientes del FGR 13 para el cálculo de la dosis por exposición externa.

Se han evaluado las dosis empleando los coeficientes de dosis del FGR y los de la ICRP 144 para un ejemplo tipo de liberación en accidente y se han analizado las diferencias entre ambos resultados. El análisis de las dosis queda restringido a la vía de exposición externa a la nube puesto que es la única vía de exposición que, en caso de accidente, se ve afectada por la actualización de los coeficientes.

La **Tabla 3** muestra el porcentaje de diferencia en la dosis efectiva por inmersión en nube calculada con los coeficientes de dosis del FGR frente a la calculada con los coeficientes de dosis de la ICRP 144.

Finalmente, la **Tabla 4** muestra el porcentaje de diferencia en la dosis equivalente a la piel por inmersión en nube calculada con los coeficientes de dosis del FGR frente a la calculada con los coeficientes de dosis de la ICRP 144 (actualmente

Dosis efectiva	
Vía de exposición	ICRP 144 (RPSI) vs. FGR
Nube	-12%
Suelo contaminado	-36%
Depósitos en orillas	-54%

**Tabla 1.** Porcentaje de diferencia en la dosis efectiva en operación normal. FGR vs ICRP 144.

Dosis efectiva	
Vía de exposición	ICRP 144 (RPSI) vs. FGR
Nube	-6%

**Tabla 3.** Porcentaje de diferencia en la dosis efectiva en accidente. FGR vs ICRP 144.

Dosis equivalente a la piel			
Vía de exposición	ICRP 144 hombre (RPSI) vs. FGR/RG 1.109	ICRP 144 mujer (RPSI) vs. FGR/RG 1.109	ICRP 144 hombre (RPSI) vs. ICRP 144 mujer (RPSI)
Nube	-7%	-8%	-1%
Suelo contaminado	-68%	-67%	1%
Depósitos en orillas	-88%	-88%	2%

**Tabla 2.** Porcentaje de diferencia en la dosis equivalente a la piel en operación normal. FGR vs ICRP 144.

Dosis equivalente a la piel			
Vía de exposición	ICRP 144 hombre (RPSI) vs. FGR/RG 1.109	ICRP 144 mujer (RPSI) vs. FGR/RG 1.109	ICRP 144 hombre (RPSI) vs. ICRP 144 mujer (RPSI)
Nube	-17%	-19%	-2%

**Tabla 4.** Porcentaje de diferencia en la dosis equivalente a la piel en accidente. FGR vs ICRP 144.

vigentes en el nuevo RPSI). La tabla incluye una columna con la comparativa entre sexos de las dosis equivalentes a la piel.

Los resultados de la **Tabla 3** y la **Tabla 4** muestran que las dosis efectiva y equivalente en piel se reducen al emplear los factores de la ICRP 144 en lugar de los del FGR 13. Con respecto a la comparación entre sexos, se concluye que la dosis a la piel por exposición a la nube es menor en mujeres que en hombres.

### COEFICIENTES DE DOSIS EFECTIVA DEPENDIENTES DE LA ENERGÍA, EL TIPO DE PARTÍCULA Y EL ÁNGULO DE INCIDENCIA

#### Publicación 116 de la ICRP

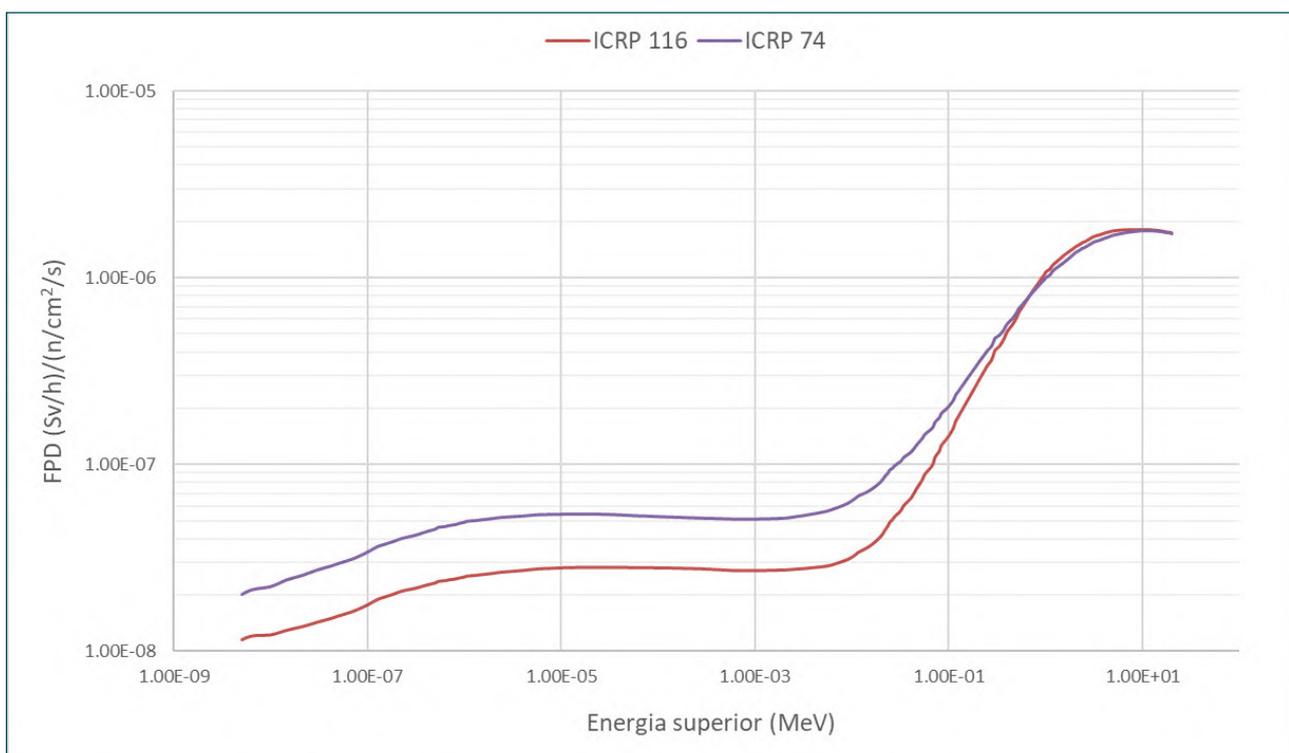
La ICRP 116 [4] es más que una actualización de la ICRP 74 [10] (incluida también en el informe 57 del ICRU [12]). En esta nueva publicación se tabulan los coeficientes de conversión a dosis efectiva no solo para fotones, neutrones y electrones, sino también para otros tipos de partículas como protones,

muones e iones de helio, en un rango de energía más amplio y para varias geometrías de irradiación. Además, de acuerdo con las recomendaciones de la ICRP 103, se calcula la dosis efectiva promediando la dosis equivalente para cada sexo.

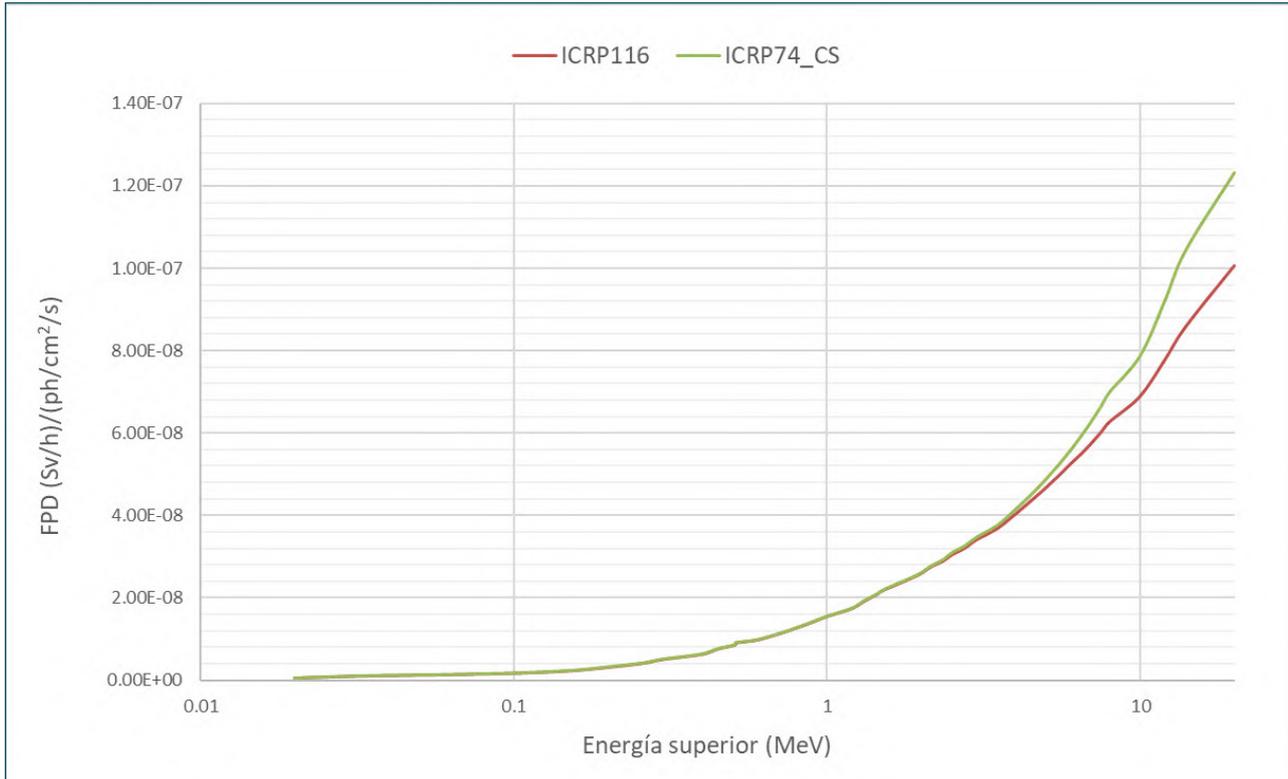
#### Comparación de los coeficientes de la ICRP 116 frente a los de la ICRP 74

En la Sección de Protección Radiológica de Empresarios Agrupados se utiliza el módulo MAVRIC del sistema SCALE [11] desarrollado por ORNL (Oak Ridge National Laboratory) para el cálculo del impacto radiológico al público por irradiación en instalaciones de almacenamiento de combustible gastado, en centrales nucleares o en instalaciones radiactivas.

En este apartado se comparan los coeficientes de dosis por exposición externa de la ICRP 116 frente a los de la ICRP 74 y se evalúa su efecto en un cálculo de dosis tipo con MAVRIC de SCALE 6.2.4. Las referencias presentan las dosis efectivas por fluencia de partícula ( $\mu\text{Sv cm}^2$ ) para varias geometrías de



**Figura 2.** Factores de conversión de flujo a dosis efectiva para neutrones con incidencia AP.



**Figura 3.** Factores de conversión de flujo a dosis efectiva para fotones con incidencia AP.

Ratio ICRP 116/ ICRP 74			
Blindaje	Neutrones	Gamma secundaria	Gamma
Aire	1,046	0,987	0,987
Hormigón	0,993	0,979	0,996

**Tabla 5.** Efecto sobre la dosis de la actualización de los coeficientes de dosis por irradiación.

incidencia, siendo la geometría anteroposterior (AP) la que da lugar a una mayor dosis efectiva.

En la **Figura 2** se comparan los factores de conversión de flujo a tasa de dosis efectiva para neutrones con una geometría de incidencia AP. Los coeficientes de la ICRP 116 son inferiores a los de la ICRP 74 en el rango bajo de energía y superiores a partir de 0,7 MeV.

De igual forma, en la **Figura 3** se comparan los factores de conversión de flujo a tasa de dosis efectiva para fotones con una geometría de incidencia AP. Los coeficientes de ambas publicaciones son equivalentes hasta una energía de 1 MeV y para energías superiores son inferiores los de la ICRP 116.

El efecto en la tasa de dosis del cambio en los coeficientes se ha obtenido comparando las dosis obtenidas debido a una fuente puntual con un espectro de emisión típico del combustible gastado.

Se compara la dosis debida a los neutrones, a las gammas secundarias y a la gamma del combustible sin blindaje y detrás de un blindaje de 20 cm de hormigón que termaliza el espectro de los neutrones que llegan al detector. La relación

entre la dosis obtenida con ambos coeficientes se recoge en la **Tabla 5**.

En el caso de una fuente sin blindaje la dosis debida a los neutrones aumenta un 5% ya que más de un 80% del espectro tiene energía superior a 0,7 MeV. Sin embargo, si se interpone un blindaje con elementos ligeros que reduce la energía de los neutrones antes de llegar al detector, la dosis obtenida con ambos factores es prácticamente equivalente.

En cuanto a la gamma, la dosis se mantiene constante con diferencias menores a la incertidumbre estadística del cálculo, ya que más del 95% del espectro tiene energía inferior a 1 MeV.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se evalúa el efecto en las aplicaciones de licencia por la actualización de los coeficientes de dosis por exposición externa a raíz de la publicación del nuevo RPSI.

La diferencia en los coeficientes de dosis equivalente a la piel entre ambos sexos depende de la vía de exposición externa

y del radionucleido considerados. Como conclusión general, para las vías de exposición a la nube radiactiva e inmersión en agua, los coeficientes de la mujer de referencia son, en su mayoría, mayores que los del hombre. Mientras que, en el caso de la vía de depósitos en suelos, la tendencia se invierte. Las diferencias máximas entre ambos coeficientes son del 5%.

Por otro lado, se puede concluir que las dosis en operación normal y en accidente disminuyen al emplear los nuevos coeficientes de la ICRP 144 en lugar de los coeficientes recogidos en el FGR 13, referencia utilizada anteriormente para estos cálculos. No obstante, es importante resaltar que este resultado depende de los isótopos que se consideran en el inventario de efluentes.

Respecto a las dosis por irradiación debidas a los fotones serán equivalentes y las de neutrones disminuirán siempre que se interponga un blindaje que disminuya la energía de los neutrones emitidos por el combustible gastado.

## REFERENCIAS

- [1]. ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, 1991.
- [2]. ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, 2007.
- [3]. ICRP, Dose coefficients for External Exposures to Environmental Sources, ICRP Publication 144, 2020.
- [4]. ICRP, Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116, 2010.
- [5]. Regulatory Guide 1.109 Rev. 1. Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluents for the Purpose of Evaluating Compliance with 10CFR50, Appendix I. Octubre de 1977.
- [6]. EPA (2002). Federal Guidance Report 13. Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides: CD Supplement, EPA 402-C-99-001, Rev. 1 (U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC).
- [7]. Consejo de Seguridad Nuclear. Guía de Seguridad 1.4 (Rev. 1) Control y vigilancia radiológica de efluentes radiactivos líquidos y gaseosos emitidos por centrales nucleares.
- [8]. Regulatory Guide 1.195. Methods and Assumptions used for evaluating radiological consequences of design basis accidents at light-water Nuclear Power Reactors. US NRC. Mayo 2003.
- [9]. Regulatory Guide 1.183. Alternative radiological source terms for evaluating design basis accidents at nuclear power reactors. US NRC, Julio 2000.
- [10]. ICRP, Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74, 1996.
- [11]. W. A. Wieselquist, R. A. Lefebvre, M. A. Jessee, Editors, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4. SCALE Code System, April 2020.
- [12]. International Commission on Radiation Units and Measurements. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRU Report 57, 1998. ■