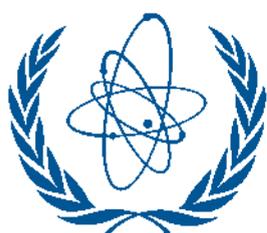


# Cantidades peligrosas de materiales radiactivos (valores D)

FECHA DE PUBLICACIÓN: DICIEMBRE DE 2010



**IAEA**

Organismo Internacional de Energía Atómica

## PUBLICACIONES DEL OIEA RELACIONADAS CON LA SEGURIDAD

### NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA

Con arreglo a lo dispuesto en el artículo III de su Estatuto, el OIEA está autorizado a establecer o adoptar normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el peligro para la vida y la propiedad, y a proveer a la aplicación de esas normas.

Las publicaciones mediante las cuales el OIEA establece las normas figuran en la **Colección de Normas de Seguridad del OIEA**. Esta serie de publicaciones abarca la seguridad nuclear, radiológica, del transporte y de los desechos. Las categorías comprendidas en esta serie son las siguientes: **Nociones fundamentales de seguridad, Requisitos de seguridad y Guías de seguridad**.

Para obtener información sobre el programa de normas de seguridad del OIEA puede consultarse el sitio del OIEA en Internet:

<http://www-ns.iaea.org/standards/>

En este sitio se encuentran los textos en inglés de las normas de seguridad publicadas y de los proyectos de normas. También figuran los textos de las normas de seguridad publicados en árabe, chino, español, francés y ruso, el glosario de seguridad del OIEA y un informe de situación relativo a las normas de seguridad que están en proceso de elaboración. Para más información se ruega ponerse en contacto con el OIEA, P.O. Box 100, 1400 Viena (Austria).

Se invita a los usuarios de las normas de seguridad del OIEA a informar al Organismo sobre su experiencia en la utilización de las normas (por ejemplo, como base de los reglamentos nacionales, para exámenes de la seguridad y para cursos de capacitación), con el fin de garantizar que sigan satisfaciendo las necesidades de los usuarios. La información puede proporcionarse a través del sitio del OIEA en Internet o por correo postal, a la dirección anteriormente señalada, o por correo electrónico, a la dirección [Official.Mail@iaea.org](mailto:Official.Mail@iaea.org).

### OTRAS PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA SEGURIDAD

Con arreglo a las disposiciones del artículo III y del párrafo C del artículo VIII de su Estatuto, el OIEA facilita y fomenta la aplicación de las normas y el intercambio de información relacionada con las actividades nucleares pacíficas, y sirve de intermediario para ello entre sus Estados Miembros.

Los informes sobre seguridad y protección en las actividades nucleares se publican como **Informes de Seguridad**, que ofrecen ejemplos prácticos y métodos detallados que se pueden utilizar en apoyo de las normas de seguridad.

Otras publicaciones del OIEA relacionadas con la seguridad se publican como **informes sobre evaluación radiológica, informes del INSAG** (Grupo Internacional Asesor en Seguridad Nuclear), **Informes Técnicos**, y **documentos TECDOC**. El OIEA publica asimismo informes sobre accidentes radiológicos, manuales de capacitación y manuales prácticos, así como otras obras especiales relacionadas con la seguridad. Las publicaciones relacionadas con la seguridad física aparecen en la **Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA**.

# ***Cantidades peligrosas de materiales radiactivos (valores D)***

FECHA DE PUBLICACIÓN: DICIEMBRE DE 2010



**IAEA**

**Organismo Internacional de Energía Atómica**

Esta publicación se preparó en la siguiente sección del OIEA:

Sección de Seguridad Radiológica y del Transporte  
Organismo Internacional de Energía Atómica  
Wagramer Strasse 5  
P.O. Box 100  
A-1400 Viena (Austria)

Cantidades peligrosas de materiales radiactivos (valores D)  
OIEA, VIENA, 2010  
EPR-D-VALUES 2006

© OIEA, 2010

Impreso por el OIEA en Austria  
Diciembre de 2010

## PREFACIO

Los materiales radiactivos se utilizan extensamente en la industria, la medicina, la educación y la agricultura. Se presentan también de forma natural. El riesgo que estos materiales representan para la salud es muy variable y depende de muchos factores, sobre todo de la cantidad del material en cuestión y su forma física y química. Existe, por tanto, la necesidad de determinar la cantidad y el tipo de materiales radiactivos en cuyo caso se justifican la preparación para emergencias y otras medidas (p. ej. de seguridad física) debido al riesgo que representan para la salud.

El objetivo de esta publicación es proporcionar a los Estados Miembros orientación práctica sobre la cantidad de material radiactivo que puede ser considerada peligrosa. Una cantidad peligrosa es aquella que, si no está controlada, podría verse afectada por un escenario plausible cuyo resultado fuera la muerte de una persona expuesta o una lesión permanente que mermase la calidad de vida de esa persona.

Este documento se publica como parte de la Colección de Preparación y Respuesta en caso de Emergencia del OIEA, y complementa a varias publicaciones entre las que se incluyen: Requisitos de Seguridad del OIEA “Preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica”, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° GS-R-2, OIEA, Viena (2003), Guía de Seguridad del OIEA “Clasificación de las fuentes radiactivas”, Colección de Normas de Seguridad N° RS-G-1.9, OIEA, Viena (2009) y Guía de Seguridad del OIEA “Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency”, Colección de Normas de Seguridad N° GS-G-2.1, OIEA, Viena (2006).

Al preparar esta publicación se ha prestado la debida atención a la exactitud de los procedimientos y los datos aquí contenidos. No obstante, como parte del proceso de revisión, están sometidos a comprobaciones constantes de garantía de calidad. Se agradecerán las observaciones que se recitan después de un periodo que permita una revisión más exhaustiva, el OIEA podría modificar esta publicación como parte del proceso de mejora continua.

En esta publicación se utilizan varios escenarios de exposición, modelos de riesgo y datos dosimétricos que podrían ser aplicados durante la respuesta a una emergencia nuclear o radiológica, o con otros fines. Ahora bien, solo debería hacerse uso de ellos tras un examen y adaptación cuidadosos de dicho informativo.

El OIEA agradece la contribución de varios expertos de Estados Miembros que participaron en la elaboración de esta publicación. El OIEA expresa especial gratitud a V. Kutkov (Instituto Kurchatov, Federación de Rusia) por su formulación del enfoque riesgo, a K. Eckerman (Laboratorio Nacional de Oak Ridge, Estados Unidos de América) por su cálculo de los factores de conversión de dosis externa, expuesto en el apéndice IV, y a B. Dodd (Estados Unidos de América) por su revisión y sus comentarios. T. McKenna, de la División de Seguridad Radiológica, del Transporte y de Desechos, fue el funcionario del OIEA responsable de esta publicación.

## *NOTA EDITORIAL*

*El uso de determinadas denominaciones de países o territorios no implica juicio alguno por parte de la entidad editora, el OIEA, sobre la situación jurídica de esos países o territorios, sus autoridades e instituciones o el trazado de sus fronteras.*

*La mención de nombres de empresas específicas o de sus productos (estén o no indicados como registrados) no implica ninguna intención de infringir los derechos de propiedad, ni debe entenderse como un reconocimiento o recomendación por parte del OIEA.*

## ÍNDICE

|  |     |
|--|-----|
| 1. INTRODUCCIÓN.....   | 1   |
| 1.1. ANTECEDENTES.....   | 1   |
| 1.2. OBJETIVO.....   | 1   |
| 1.3. ÁMBITO.....   | 2   |
| 1.4. ESTRUCTURA.....   | 2   |
| 2. VALORES D RECOMENDADOS .....  | 3   |
| 3. EFECTOS EN LA SALUD CONSIDERADOS .....  | 12  |
| 3.1 EFECTOS DETERMINISTAS LETALES EN LA SALUD.....   | 13  |
| 3.2 EFECTOS DETERMINISTAS NO LETALES EN LA SALUD .....   | 13  |
| 4. ESCENARIOS Y VÍAS DE EXPOSICIÓN .....   | 14  |
| 5. CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE UNA FUENTE .....   | 16  |
| 6. ENFOQUES PARA EL CÁLCULO DE LOS VALORES D.....  | 18  |
| APÉNDICE I NIVELES DE REFERENCIA Y UMBRAL PARA LA APARICIÓN DE<br>EFECTOS DETERMINISTAS.....   | 21  |
| APÉNDICE II ESCENARIOS PARA DETERMINAR LOS VALORES D .....   | 37  |
| APÉNDICE III CÁLCULO DE LOS VALORES D .....  | 47  |
| APÉNDICE IV FACTORES DE CONVERSIÓN DE TASA DE DOSIS EXTERNA .....  | 61  |
| APÉNDICE V FACTORES DE CONVERSIÓN DE DOSIS POR INHALACIÓN,<br>INMERSIÓN Y CONTAMINACIÓN DE LA PIEL UTILIZADOS EN EL ENFOQUE<br>EXPERTO.....            | 83  |
| APÉNDICE VI FACTORES DE CONVERSIÓN DE DOSIS POR INHALACIÓN,<br>INGESTIÓN, INMERSIÓN Y CONTAMINACIÓN DE LA PIEL UTILIZADOS EN EL<br>ENFOQUE RIESGO..... | 87  |
| APÉNDICE VII EVALUACIÓN DE LOS VALORES D .....   | 109 |
| APÉNDICE VIII CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES RADIATIVAS.....   | 115 |
| REFERENCIAS .....  | 133 |
| DEFINICIONES .....   | 139 |
| ANEXO I.....   | 145 |
| FORMATO DE SÍMBOLOS E ÍNDICES.....   | 145 |
| ANEXO II SÍMBOLOS ESPECÍFICOS .....  | 146 |
| COLABORADORES EN LA PREPARACIÓN Y EXAMEN.....  | 153 |



## 1. INTRODUCCIÓN

En marzo de 2002 la Junta de Gobernadores del OIEA aprobó una publicación de Requisitos de Seguridad titulada “Preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica” [1]. Esta publicación fue copatrocinada por siete organizaciones internacionales y estableció las condiciones para un nivel adecuado de preparación y respuesta a una emergencia nuclear o radiológica en cualquier Estado Miembro. Entre otras cosas, la publicación especifica a medidas relativas a emergencias en las que esté presente una fuente peligrosa. En los Requisitos se define fuente peligrosa como aquella que, “de no estar controlada, podría dar lugar a una exposición suficiente para causar efectos deterministas graves”. Asimismo, los Requisitos definen efecto determinista grave como aquél que “causa o puede causar la muerte o produce una lesión permanente que merma la calidad de vida”.

Para poder aplicar los Requisitos [1] se precisaba una definición de fuente peligrosa con fines operacionales. Esta definición operacional de fuente peligrosa es conocida como el valor D. El valor D es aquella cantidad de material radiactivo que, si no estuviera bajo control, podría causar la muerte de una persona expuesta o una lesión permanente que mermase su calidad de vida. Las Refs. [2] y [3] proporcionan los valores D correspondientes a 65 radionucleidos aproximadamente. Sin embargo, en esas publicaciones no se expuso en detalle la justificación de esos valores D. Además, no se establecieron valores D para todos los radionucleidos que pudieran ser motivo de preocupación. Ante la necesidad de ordenar las fuentes radiactivas por su potencial para causar efectos deterministas en la salud, los valores D fueron utilizados también como factores normalizadores para obtener la clasificación numérica relativa de fuentes y prácticas. De este modo, los valores D de la Ref. [2] se utilizaron también como base del sistema de clasificación de fuentes radiactivas del OIEA [4], algunas de cuyas partes se incluyeron en el Código de conducta sobre la seguridad tecnológica y física de las fuentes radiactivas [5].

### 1.1. ANTECEDENTES

Para determinar los valores D se utilizan diversos escenarios de exposición bien definidos. Se tiene en cuenta el hecho de que las fuentes pueden ser más peligrosas con el transcurso del tiempo (conforme avanza su vida) debido al aumento interno de la progenie. No obstante, los valores D se expresan en función de la actividad de los radionucleidos predecesores antes de la desintegración, es decir, en el momento de la fabricación.

La utilización de valores D demasiado conservadores puede derivar en acciones no justificadas y el uso no justificado de recursos, y puede dar una percepción poco realista de los riesgos a los encargados de la adopción de decisiones y al público. Por consiguiente, los valores D se calcularon sobre la base de evaluaciones realistas (no demasiado conservadoras) de los riesgos planteados por el material radiactivo si deja de estar bajo control.

Debe señalarse que pueden ser peligrosas cantidades de material inferiores a los valores D presentados en este informe. Esto podría suceder si se produjera una ingestión intencionada de material radiactivo o si alguien se expusiera deliberadamente a una fuente radiactiva. En las Refs. [2, 4] se da una explicación en términos sencillos de los riesgos asociados a distintos múltiplos de los valores D.

### 1.2. OBJETIVO

Los objetivos de esta publicación son explicar en detalle el fundamento de los valores D que figuran en las Refs. [2, 3, 4] y proporcionar un conjunto ampliado de valores D que incluya otros radionucleidos que pudieran ser importantes en caso de emergencia nuclear o radiológica.

### **1.3. ÁMBITO**

Se presentan los valores D correspondientes a radionucleidos no dispersados (valores  $D_1$ ) y dispersados (valores  $D_2$ ) que pueden ser importantes en el caso de una emergencia nuclear o radiológica. Esta lista contiene los radionucleidos considerados en el Reglamento de Transporte [6], pero ha sido ampliada para incluir productos de fisión importantes y posibles materiales fisionables. Se examina la exposición externa (distante y adyacente) en el caso de los materiales no dispersados. Cuando se trata de material radiactivo dispersado, se consideran tanto los peligros derivados de la incorporación por ingestión involuntaria, por consumo de agua contaminada o por inhalación, como los derivados de la contaminación de la piel. En el caso de gases nobles se considera únicamente la exposición externa por inmersión.

### **1.4. ESTRUCTURA**

La sección 2 contiene una lista de los valores D recomendados. Las secciones 3, 4 y 5 presentan un resumen de su fundamento, en el que se examinan los efectos en la salud, los escenarios y las características del material radiactivo tenidos en cuenta. La sección 6 describe los enfoques utilizados para calcular los valores D.

En los apéndices figuran la información y la base técnica de las que se deducen los valores D. Los niveles de referencia y umbral para la aparición de los efectos deterministas se presentan en el Apéndice I. En el Apéndice II se describen los escenarios adoptados para el establecimiento de los valores D. El Apéndice III contiene una descripción detallada de los enfoques empleados para establecerlos. Los factores de conversión de dosis para exposición externa e interna y sus fundamentos se tratan en los Apéndices IV, V y VI. El Apéndice VII contiene una evaluación de los valores D. Esta evaluación incluye una comparación de los valores D recomendados con la actividad de fuentes radiactivas involucradas en emergencias radiológicas. En el Apéndice VIII se presentan las características nucleares básicas de los radionucleidos considerados. Este Apéndice contiene asimismo una descripción del enfoque utilizado para analizar la desintegración radiactiva y el aumento interno de la progenie.

Los Anexos I y II proporcionan aclaraciones sobre la notación utilizada en este informe.

## 2. VALORES D RECOMENDADOS

Los escenarios de exposición utilizados para determinar los valores D se dividen en dos grupos: uno relativo a materiales no dispersados y otro a materiales dispersados. Para cada uno de estos grupos se presentan diferentes valores numéricos:

- El valor  $D_1$  es la actividad<sup>1</sup> de un radionucleido de una fuente que, si está incontrolada pero no dispersada (es decir, permanece encapsulada), podría provocar una emergencia de la cual cabría esperar razonablemente que causase efectos deterministas graves en la salud.
- El valor  $D_2$  es la actividad<sup>1</sup> de un radionucleido de una fuente que, si está incontrolada y dispersada, podría provocar una emergencia de la cual cabría esperar razonablemente que causase efectos deterministas graves en la salud.
- El valor D es el menor de los valores  $D_1$  y  $D_2$  correspondientes a un radionucleido.

Los valores  $D_1$ ,  $D_2$  y D recomendados figuran en el Cuadro 1.

CUADRO 1. VALORES D RECOMENDADOS

| Radionucleido <sup>a</sup> | Valor D             | Valor $D_1$     | Valor $D_2$         |
|----------------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
|                            | (TBq)               | (TBq)           | (TBq)               |
| H-3                        | 2.E+03              | UL <sup>b</sup> | 2.E+03 <sup>c</sup> |
| Be-7                       | 1.E+00              | 1.E+00          | 1.E+03              |
| Be-10                      | 3.E+01              | 3.E+02          | 3.E+01              |
| C-11                       | 6.E-02              | 6.E-02          | 4.E+02              |
| C-14                       | 5.E+01              | 2.E+05          | 5.E+01              |
| N-13                       | 6.E-02              | 6.E-02          | UL                  |
| F-18                       | 6.E-02              | 6.E-02          | 3.E+01              |
| Na-22                      | 3.E-02              | 3.E-02          | 2.E+01              |
| Na-24                      | 2.E-02              | 2.E-02          | 2.E+01              |
| Mg-28                      | 2.E-02              | 2.E-02          | 1.E+01              |
| Al-26                      | 3.E-02              | 3.E-02          | 5.E+00              |
| Si-31                      | 1.E+01              | 1.E+01          | 2.E+01              |
| Si-32+                     | 7.E+00              | 1.E+01          | 7.E+00              |
| P-32                       | 1.E+01              | 1.E+01          | 2.E+01              |
| P-33                       | 2.E+02              | 7.E+03          | 2.E+02              |
| S-35                       | 6.E+01              | 4.E+04          | 6.E+01              |
| Cl-36                      | 2.E+01 <sup>d</sup> | 3.E+02          | 2.E+01 <sup>d</sup> |
| Cl-38                      | 5.E-02              | 5.E-02          | 1.E+01              |
| Ar-37                      | UL <sup>e</sup>     | UL              | UL <sup>e</sup>     |
| Ar-39                      | 3.E+02              | 3.E+02          | 3.E+04              |
| Ar-41                      | 5.E-02              | 5.E-02          | 3.E+00 <sup>d</sup> |
| K-40                       | UL <sup>e</sup>     | UL              | UL <sup>e</sup>     |

<sup>1</sup> Se tiene en cuenta el hecho de que las fuentes pueden ser más peligrosas con el transcurso del tiempo (hasta 10 años) debido al aumento interno de la progenie; no obstante, los valores D se expresan en función de la actividad de los radionucleidos predecesores antes de la desintegración, es decir, en el momento de la fabricación, como se señala en el Apéndice VIII.

| Radionucleido <sup>a</sup> | Valor D             | Valor D <sub>1</sub> | Valor D <sub>2</sub> |
|----------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
|                            | (TBq)               | (TBq)                | (TBq)                |
| K-42                       | 2.E-01              | 2.E-01               | 1.E+01               |
| K-43                       | 7.E-02              | 7.E-02               | 3.E+01               |
| Ca-41                      | UL <sup>e</sup>     | UL                   | UL <sup>e</sup>      |
| Ca-45                      | 1.E+02              | 6.E+03               | 1.E+02               |
| Ca-47+                     | 6.E-02              | 6.E-02               | 1.E+01               |
| Sc-44                      | 3.E-02              | 3.E-02               | 1.E+01               |
| Sc-46                      | 3.E-02              | 3.E-02               | 4.E+01               |
| Sc-47                      | 7.E-01              | 7.E-01               | 8.E+01               |
| Sc-48                      | 2.E-02              | 2.E-02               | 3.E+01               |
| Ti-44+                     | 3.E-02              | 3.E-02               | 9.E+00               |
| V-48                       | 2.E-02              | 2.E-02               | 3.E+01               |
| V-49                       | 2.E+03              | UL                   | 2.E+03               |
| Cr-51                      | 2.E+00              | 2.E+00               | 5.E+03               |
| Mn-52                      | 2.E-02              | 2.E-02               | 2.E+01               |
| Mn-53                      | UL <sup>e</sup>     | UL                   | UL <sup>e</sup>      |
| Mn-54                      | 8.E-02              | 8.E-02               | 4.E+01               |
| Mn-56                      | 4.E-02              | 4.E-02               | 2.E+01               |
| Fe-52+                     | 2.E-02              | 2.E-02               | 9.E+00               |
| Fe-55                      | 8.E+02              | UL                   | 8.E+02               |
| Fe-59                      | 6.E-02              | 6.E-02               | 1.E+01               |
| Fe-60+                     | 6.E-02              | 6.E-02               | 1.E+01 <sup>d</sup>  |
| Co-55+                     | 3.E-02              | 3.E-02               | 2.E+02               |
| Co-56                      | 2.E-02              | 2.E-02               | 2.E+01               |
| Co-57                      | 7.E-01              | 7.E-01               | 4.E+02               |
| Co-58                      | 7.E-02              | 7.E-02               | 7.E+01               |
| Co-58m+                    | 7.E-02              | 7.E-02               | 2.E+02               |
| Co-60                      | 3.E-02              | 3.E-02               | 3.E+01               |
| Ni-59                      | 1.E+03 <sup>d</sup> | UL                   | 1.E+03 <sup>d</sup>  |
| Ni-63                      | 6.E+01              | UL                   | 6.E+01               |
| Ni-65                      | 1.E-01              | 1.E-01               | 2.E+01               |
| Cu-64                      | 3.E-01              | 3.E-01               | 4.E+01               |
| Cu-67                      | 7.E-01              | 7.E-01               | 3.E+02               |
| Zn-65                      | 1.E-01              | 1.E-01               | 3.E+02               |
| Zn-69                      | 3.E+01              | 8.E+01               | 3.E+01               |
| Zn-69m+                    | 2.E-01              | 2.E-01               | 2.E+01               |
| Ga-67                      | 5.E-01              | 5.E-01               | 4.E+02               |
| Ga-68                      | 7.E-02              | 7.E-02               | 1.E+01               |
| Ga-72                      | 3.E-02              | 3.E-02               | 2.E+01               |
| Ge-68+                     | 7.E-02              | 7.E-02               | 2.E+01               |
| Ge-71                      | 1.E+03              | 6.E+05               | 1.E+03               |
| Ge-77+                     | 6.E-02              | 6.E-02               | 1.E+01               |
| As-72                      | 4.E-02              | 4.E-02               | 9.E+01               |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Valor D             | Valor D <sub>1</sub> | Valor D <sub>2</sub> |
|----------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
|                            | (TBq)               | (TBq)                | (TBq)                |
| As-73                      | 4.E+01              | 4.E+01               | 1.E+02               |
| As-74                      | 9.E-02              | 9.E-02               | 3.E+01               |
| As-76                      | 2.E-01              | 2.E-01               | 1.E+01               |
| As-77                      | 8.E+00              | 8.E+00               | 4.E+01               |
| Se-75                      | 2.E-01              | 2.E-01               | 2.E+02               |
| Se-79                      | 2.E+02              | UL                   | 2.E+02               |
| Br-76                      | 3.E-02              | 3.E-02               | 2.E+02               |
| Br-77                      | 2.E-01              | 2.E-01               | 7.E+02               |
| Br-82                      | 3.E-02              | 3.E-02               | 7.E+01               |
| Kr-81                      | 3.E+01              | 3.E+01               | 7.E+02               |
| Kr-85                      | 3.E+01              | 3.E+01               | 2.E+03               |
| Kr-85m                     | 5.E-01              | 5.E-01               | 3.E+01               |
| Kr-87                      | 9.E-02              | 9.E-02               | 4.E+00               |
| Rb-81                      | 1.E-01              | 1.E-01               | 2.E+03               |
| Rb-83                      | 1.E-01              | 1.E-01               | 5.E+01               |
| Rb-84                      | 7.E-02              | 7.E-02               | 2.E+01               |
| Rb-86                      | 7.E-01              | 7.E-01               | 2.E+01               |
| Rb-87                      | UL <sup>e</sup>     | UL                   | UL <sup>e</sup>      |
| Sr-82                      | 6.E-02              | 6.E-02               | 5.E+00               |
| Sr-85                      | 1.E-01              | 1.E-01               | 7.E+01               |
| Sr-85m+                    | 1.E-01              | 1.E-01               | 3.E+02               |
| Sr-87m                     | 2.E-01              | 2.E-01               | 9.E+01               |
| Sr-89                      | 2.E+01              | 2.E+01               | 2.E+01               |
| Sr-90+                     | 1.E+00              | 4.E+00               | 1.E+00               |
| Sr-91+                     | 6.E-02              | 6.E-02               | 2.E+01               |
| Sr-92+                     | 4.E-02              | 4.E-02               | 1.E+01               |
| Y-87+                      | 9.E-02              | 9.E-02               | 2.E+02               |
| Y-88                       | 3.E-02              | 3.E-02               | 2.E+01               |
| Y-90                       | 5.E+00              | 5.E+00               | 1.E+01               |
| Y-91                       | 8.E+00              | 8.E+00               | 2.E+01               |
| Y-91m+                     | 1.E-01              | 1.E-01               | 2.E+02               |
| Y-92                       | 2.E-01              | 2.E-01               | 1.E+01               |
| Y-93                       | 6.E-01              | 6.E-01               | 1.E+01               |
| Zr-88+                     | 2.E-02              | 2.E-02               | 3.E+01               |
| Zr-93+                     | UL <sup>e</sup>     | UL                   | UL <sup>e</sup>      |
| Zr-95+                     | 4.E-02              | 4.E-02               | 1.E+01               |
| Zr-97+                     | 4.E-02              | 4.E-02               | 9.E+00               |
| Nb-93m                     | 3.E+02              | 2.E+03               | 3.E+02               |
| Nb-94                      | 4.E-02              | 4.E-02               | 3.E+01 <sup>d</sup>  |
| Nb-95                      | 9.E-02              | 9.E-02               | 6.E+01               |
| Nb-97                      | 1.E-01              | 1.E-01               | 2.E+01               |
| Mo-93+                     | 3.E+02 <sup>d</sup> | 2.E+03               | 3.E+02 <sup>d</sup>  |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Valor D         | Valor D <sub>1</sub> | Valor D <sub>2</sub> |
|----------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
|                            | (TBq)           | (TBq)                | (TBq)                |
| Mo-99+                     | 3.E-01          | 3.E-01               | 2.E+01               |
| Tc-95m                     | 1.E-01          | 1.E-01               | 6.E+01               |
| Tc-96                      | 3.E-02          | 3.E-02               | 3.E+01               |
| Tc-96m+                    | 3.E-02          | 3.E-02               | 2.E+02               |
| Tc-97                      | UL <sup>e</sup> | UL                   | UL <sup>e</sup>      |
| Tc-97m                     | 4.E+01          | 2.E+02               | 4.E+01               |
| Tc-98                      | 5.E-02          | 5.E-02               | 1.E+01 <sup>d</sup>  |
| Tc-99                      | 3.E+01          | UL                   | 3.E+01               |
| Tc-99m                     | 7.E-01          | 7.E-01               | 7.E+02               |
| Ru-97                      | 3.E-01          | 3.E-01               | 5.E+02               |
| Ru-103+                    | 1.E-01          | 1.E-01               | 3.E+01               |
| Ru-105+                    | 8.E-02          | 8.E-02               | 2.E+01               |
| Ru-106+                    | 3.E-01          | 3.E-01               | 1.E+01               |
| Rh-99                      | 1.E-01          | 1.E-01               | 1.E+02               |
| Rh-101                     | 3.E-01          | 3.E-01               | 1.E+02               |
| Rh-102                     | 3.E-02          | 3.E-02               | 3.E+01               |
| Rh-102m                    | 1.E-01          | 1.E-01               | 4.E+01               |
| Rh-103m                    | 9.E+02          | 9.E+02               | 1.E+04               |
| Rh-105                     | 9.E-01          | 9.E-01               | 8.E+01               |
| Pd-103+                    | 9.E+01          | 9.E+01               | 1.E+02               |
| Pd-107                     | UL <sup>e</sup> | UL                   | UL <sup>e</sup>      |
| Pd-109                     | 2.E+01          | 2.E+01               | 2.E+01               |
| Ag-105                     | 1.E-01          | 1.E-01               | 1.E+02               |
| Ag-108m                    | 4.E-02          | 4.E-02               | 2.E+01               |
| Ag-110m                    | 2.E-02          | 2.E-02               | 2.E+01               |
| Ag-111                     | 2.E+00          | 2.E+00               | 3.E+01               |
| Cd-109                     | 2.E+01          | 2.E+01               | 3.E+01               |
| Cd-113m                    | 4.E+01          | 4.E+02               | 4.E+01               |
| Cd-115+                    | 2.E-01          | 2.E-01               | 2.E+01               |
| Cd-115m                    | 3.E+00          | 3.E+00               | 2.E+01               |
| In-111                     | 2.E-01          | 2.E-01               | 1.E+02               |
| In-113m                    | 3.E-01          | 3.E-01               | 5.E+01               |
| In-114m                    | 8.E-01          | 8.E-01               | 1.E+00               |
| In-115m                    | 4.E-01          | 4.E-01               | 3.E+01               |
| Sn-113+                    | 3.E-01          | 3.E-01               | 5.E+01               |
| Sn-117m                    | 5.E-01          | 5.E-01               | 4.E+01               |
| Sn-119m                    | 7.E+01          | 7.E+01               | 1.E+02               |
| Sn-121m+                   | 7.E+01          | 1.E+02               | 7.E+01               |
| Sn-123                     | 7.E+00          | 7.E+00               | 2.E+01               |
| Sn-125                     | 1.E-01          | 1.E-01               | 8.E+00               |
| Sn-126+                    | 3.E-02          | 3.E-02               | 7.E+00 <sup>d</sup>  |
| Sb-122                     | 1.E-01          | 1.E-01               | 2.E+01               |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Valor D         | Valor D <sub>1</sub> | Valor D <sub>2</sub> |
|----------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
|                            | (TBq)           | (TBq)                | (TBq)                |
| Sb-124                     | 4.E-02          | 4.E-02               | 1.E+01               |
| Sb-125+                    | 2.E-01          | 2.E-01               | 3.E+01               |
| Sb-126                     | 2.E-02          | 2.E-02               | 2.E+01               |
| Te-121                     | 1.E-01          | 1.E-01               | 3.E+01               |
| Te-121m+                   | 1.E-01          | 1.E-01               | 8.E+00               |
| Te-123m                    | 6.E-01          | 6.E-01               | 9.E+00               |
| Te-125m                    | 1.E+01          | 2.E+01               | 1.E+01               |
| Te-127                     | 1.E+01          | 1.E+01               | 4.E+01               |
| Te-127m+                   | 3.E+00          | 1.E+01               | 3.E+00               |
| Te-129                     | 1.E+00          | 1.E+00               | 2.E+01               |
| Te-129m+                   | 1.E+00          | 1.E+00               | 2.E+00               |
| Te-131m+                   | 4.E-02          | 4.E-02               | 2.E-01               |
| Te-132+                    | 3.E-02          | 3.E-02               | 8.E-01               |
| I-123                      | 5.E-01          | 5.E-01               | 3.E+01               |
| I-124                      | 6.E-02          | 6.E-02               | 4.E-01               |
| I-125                      | 2.E-01          | 1.E+01               | 2.E-01               |
| I-126                      | 1.E-01          | 1.E-01               | 2.E-01               |
| I-129                      | UL <sup>e</sup> | UL                   | UL <sup>e</sup>      |
| I-131                      | 2.E-01          | 2.E-01               | 2.E-01               |
| I-132                      | 3.E-02          | 3.E-02               | 6.E+00               |
| I-133                      | 1.E-01          | 1.E-01               | 3.E-01               |
| I-134                      | 3.E-02          | 3.E-02               | 2.E+01               |
| I-135                      | 4.E-02          | 4.E-02               | 2.E+00               |
| Xe-122                     | 6.E-02          | 6.E-02               | 4.E+00               |
| Xe-123+                    | 9.E-02          | 9.E-02               | 5.E+00               |
| Xe-127                     | 3.E-01          | 3.E-01               | 2.E+01               |
| Xe-131m                    | 1.E+01          | 1.E+01               | 7.E+02               |
| Xe-133                     | 3.E+00          | 3.E+00               | 2.E+02               |
| Xe-135                     | 3.E-01          | 3.E-01               | 2.E+01               |
| Cs-129                     | 3.E-01          | 3.E-01               | 1.E+03               |
| Cs-131                     | 2.E+01          | 2.E+01               | 2.E+03               |
| Cs-132                     | 1.E-01          | 1.E-01               | 1.E+02               |
| Cs-134                     | 4.E-02          | 4.E-02               | 3.E+01               |
| Cs-134m+                   | 4.E-02          | 4.E-02               | 1.E+04               |
| Cs-135                     | UL <sup>e</sup> | UL                   | UL <sup>e</sup>      |
| Cs-136                     | 3.E-02          | 3.E-02               | 2.E+01               |
| Cs-137+                    | 1.E-01          | 1.E-01               | 2.E+01               |
| Ba-131+                    | 2.E-01          | 2.E-01               | 1.E+02               |
| Ba-133                     | 2.E-01          | 2.E-01               | 7.E+01               |
| Ba-133m                    | 3.E-01          | 3.E-01               | 2.E+02               |
| Ba-140+                    | 3.E-02          | 3.E-02               | 1.E+01               |
| La-137                     | 2.E+01          | 2.E+01               | 5.E+02 <sup>d</sup>  |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Valor D         | Valor D <sub>1</sub> | Valor D <sub>2</sub> |
|----------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
|                            | (TBq)           | (TBq)                | (TBq)                |
| La-140                     | 3.E-02          | 3.E-02               | 2.E+01               |
| Ce-139                     | 6.E-01          | 6.E-01               | 2.E+02               |
| Ce-141                     | 1.E+00          | 1.E+00               | 2.E+01               |
| Ce-143+                    | 3.E-01          | 3.E-01               | 1.E+01               |
| Ce-144+                    | 9.E-01          | 9.E-01               | 9.E+00               |
| Pr-142                     | 1.E+00          | 1.E+00               | 2.E+01               |
| Pr-143                     | 3.E+01          | 8.E+01               | 3.E+01               |
| Nd-147+                    | 6.E-01          | 6.E-01               | 4.E+01               |
| Nd-149+                    | 2.E-01          | 2.E-01               | 1.E+01               |
| Pm-143                     | 2.E-01          | 2.E-01               | 2.E+02               |
| Pm-144                     | 4.E-02          | 4.E-02               | 3.E+01               |
| Pm-145                     | 1.E+01          | 1.E+01               | 4.E+02               |
| Pm-147                     | 4.E+01          | 8.E+03               | 4.E+01               |
| Pm-148m                    | 3.E-02          | 3.E-02               | 3.E+01               |
| Pm-149                     | 6.E+00          | 6.E+00               | 2.E+01               |
| Pm-151                     | 2.E-01          | 2.E-01               | 3.E+01               |
| Sm-145+                    | 4.E+00          | 4.E+00               | 2.E+02               |
| Sm-147                     | UL <sup>e</sup> | UL                   | UL <sup>e</sup>      |
| Sm-151                     | 5.E+02          | UL                   | 5.E+02               |
| Sm-153                     | 2.E+00          | 2.E+00               | 4.E+01               |
| Eu-147                     | 2.E-01          | 2.E-01               | 1.E+02               |
| Eu-148                     | 3.E-02          | 3.E-02               | 3.E+01               |
| Eu-149                     | 2.E+00          | 2.E+00               | 5.E+02               |
| Eu-150b                    | 2.E+00          | 2.E+00               | 3.E+01               |
| Eu-150a                    | 5.E-02          | 5.E-02               | 4.E+02               |
| Eu-152                     | 6.E-02          | 6.E-02               | 3.E+01               |
| Eu-152m                    | 2.E-01          | 2.E-01               | 2.E+01               |
| Eu-154                     | 6.E-02          | 6.E-02               | 2.E+01               |
| Eu-155                     | 2.E+00          | 2.E+00               | 1.E+02               |
| Eu-156                     | 5.E-02          | 5.E-02               | 3.E+01               |
| Gd-146+                    | 3.E-02          | 3.E-02               | 8.E+00               |
| Gd-148                     | 4.E-01          | UL                   | 4.E-01               |
| Gd-153                     | 1.E+00          | 1.E+00               | 8.E+01               |
| Gd-159                     | 2.E+00          | 2.E+00               | 3.E+01               |
| Tb-157                     | 1.E+02          | 1.E+02               | 1.E+03 <sup>d</sup>  |
| Tb-158                     | 9.E-02          | 9.E-02               | 5.E+01 <sup>d</sup>  |
| Tb-160                     | 6.E-02          | 6.E-02               | 3.E+01               |
| Dy-159                     | 6.E+00          | 6.E+00               | 5.E+02               |
| Dy-165                     | 3.E+00          | 3.E+00               | 2.E+01               |
| Dy-166+                    | 1.E+00          | 1.E+00               | 2.E+01               |
| Ho-166                     | 2.E+00          | 2.E+00               | 2.E+01               |
| Ho-166m                    | 4.E-02          | 4.E-02               | 3.E+01 <sup>d</sup>  |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Valor D         | Valor D <sub>1</sub> | Valor D <sub>2</sub> |
|----------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
|                            | (TBq)           | (TBq)                | (TBq)                |
| Er-169                     | 2.E+02          | 2.E+03               | 2.E+02               |
| Er-171                     | 2.E-01          | 2.E-01               | 2.E+01               |
| Tm-167                     | 6.E-01          | 6.E-01               | 2.E+02               |
| Tm-170                     | 2.E+01          | 2.E+01               | 2.E+01               |
| Tm-171                     | 3.E+02          | 3.E+02               | 4.E+02               |
| Yb-169                     | 3.E-01          | 3.E-01               | 3.E+01               |
| Yb-175                     | 2.E+00          | 2.E+00               | 1.E+02               |
| Lu-172                     | 4.E-02          | 4.E-02               | 6.E+01               |
| Lu-173                     | 9.E-01          | 9.E-01               | 2.E+02               |
| Lu-174                     | 8.E-01          | 8.E-01               | 1.E+02               |
| Lu-174m+                   | 6.E-01          | 6.E-01               | 6.E+01               |
| Lu-177                     | 2.E+00          | 2.E+00               | 1.E+02               |
| Hf-172+                    | 4.E-02          | 4.E-02               | 6.E+00               |
| Hf-175                     | 2.E-01          | 2.E-01               | 3.E+01               |
| Hf-181                     | 1.E-01          | 1.E-01               | 1.E+01               |
| Hf-182+                    | 5.E-02          | 5.E-02               | UL <sup>e</sup>      |
| Ta-178a                    | 7.E-02          | 7.E-02               | 4.E+03               |
| Ta-179                     | 6.E+00          | 6.E+00               | 6.E+02               |
| Ta-182                     | 6.E-02          | 6.E-02               | 3.E+01               |
| W-178                      | 9.E-01          | 9.E-01               | 6.E+02               |
| W-181                      | 5.E+00          | 5.E+00               | 2.E+03               |
| W-185                      | 1.E+02          | 7.E+02               | 1.E+02               |
| W-187                      | 1.E-01          | 1.E-01               | 3.E+01               |
| W-188+                     | 1.E+00          | 1.E+00               | 8.E+00               |
| Re-184                     | 8.E-02          | 8.E-02               | 3.E+01               |
| Re-184m+                   | 7.E-02          | 7.E-02               | 2.E+01               |
| Re-186                     | 4.E+00          | 4.E+00               | 1.E+01               |
| Re-187                     | UL <sup>e</sup> | UL                   | UL <sup>e</sup>      |
| Re-188                     | 1.E+00          | 1.E+00               | 3.E+01               |
| Re-189                     | 1.E+00          | 1.E+00               | 1.E+01               |
| Os-185                     | 1.E-01          | 1.E-01               | 7.E+01               |
| Os-191                     | 2.E+00          | 2.E+00               | 9.E+01               |
| Os-191m+                   | 1.E+00          | 1.E+00               | 7.E+02               |
| Os-193                     | 1.E+00          | 1.E+00               | 3.E+01               |
| Os-194+                    | 7.E-01          | 7.E-01               | 9.E+00               |
| Ir-189                     | 1.E+00          | 1.E+00               | 2.E+02               |
| Ir-190                     | 5.E-02          | 5.E-02               | 6.E+01               |
| Ir-192                     | 8.E-02          | 8.E-02               | 2.E+01               |
| Ir-194                     | 7.E-01          | 7.E-01               | 2.E+01               |
| Pt-188+                    | 4.E-02          | 4.E-02               | 9.E+01               |
| Pt-191                     | 3.E-01          | 3.E-01               | 3.E+02               |
| Pt-193                     | 3.E+03          | 1.E+05               | 3.E+03               |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Valor D         | Valor D <sub>1</sub> | Valor D <sub>2</sub> |
|----------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
|                            | (TBq)           | (TBq)                | (TBq)                |
| Pt-193m                    | 1.E+01          | 1.E+01               | 4.E+02               |
| Pt-195m                    | 2.E+00          | 2.E+00               | 3.E+02               |
| Pt-197                     | 4.E+00          | 4.E+00               | 5.E+01               |
| Pt-197m+                   | 9.E-01          | 9.E-01               | 2.E+01               |
| Au-193                     | 6.E-01          | 6.E-01               | 1.E+03               |
| Au-194                     | 7.E-02          | 7.E-02               | 4.E+02               |
| Au-195                     | 2.E+00          | 2.E+00               | 1.E+02               |
| Au-198                     | 2.E-01          | 2.E-01               | 3.E+01               |
| Au-199                     | 9.E-01          | 9.E-01               | 3.E+02               |
| Hg-194+                    | 7.E-02          | 7.E-02               | 9.E+00               |
| Hg-195m+                   | 2.E-01          | 2.E-01               | 1.E+01               |
| Hg-197                     | 2.E+00          | 2.E+00               | 3.E+01               |
| Hg-197m+                   | 7.E-01          | 7.E-01               | 2.E+01               |
| Hg-203                     | 3.E-01          | 3.E-01               | 2.E+00               |
| Tl-200                     | 5.E-02          | 5.E-02               | 2.E+02               |
| Tl-201                     | 1.E+00          | 1.E+00               | 1.E+03               |
| Tl-202                     | 2.E-01          | 2.E-01               | 2.E+02               |
| Tl-204                     | 2.E+01          | 7.E+01               | 2.E+01               |
| Pb-201+                    | 9.E-02          | 9.E-02               | 8.E+02               |
| Pb-202+                    | 2.E-01          | 2.E-01               | 6.E+01 <sup>d</sup>  |
| Pb-203                     | 2.E-01          | 2.E-01               | 2.E+02               |
| Pb-205                     | UL <sup>e</sup> | UL                   | UL <sup>e</sup>      |
| Pb-210+                    | 3.E-01          | 4.E+01               | 3.E-01               |
| Pb-212+                    | 5.E-02          | 5.E-02               | 9.E+00               |
| Bi-205                     | 4.E-02          | 4.E-02               | 7.E+01               |
| Bi-206                     | 2.E-02          | 2.E-02               | 5.E+01               |
| Bi-207                     | 5.E-02          | 5.E-02               | 4.E+01               |
| Bi-210+                    | 8.E+00          | 5.E+01               | 8.E+00               |
| Bi-210m                    | 3.E-01          | 6.E-01               | 3.E-01               |
| Bi-212+                    | 5.E-02          | 5.E-02               | 1.E+01               |
| Po-210                     | 6.E-02          | 8.E+03               | 6.E-02               |
| At-211                     | 5.E-01          | 5.E-01               | 1.E+01               |
| Rn-222                     | 4.E-02          | 4.E-02               | 9.E+04 <sup>f</sup>  |
| Ra-223+                    | 1.E-01          | 2.E-01               | 1.E-01               |
| Ra-224+                    | 5.E-02          | 5.E-02               | 3.E-01               |
| Ra-225+                    | 1.E-01          | 3.E-01               | 1.E-01               |
| Ra-226+                    | 4.E-02          | 4.E-02               | 7.E-02               |
| Ra-228+                    | 3.E-02          | 3.E-02               | 4.E-02               |
| Ac-225                     | 9.E-02          | 3.E-01               | 9.E-02               |
| Ac-227+                    | 4.E-02          | 2.E-01               | 4.E-02               |
| Ac-228                     | 3.E-02          | 3.E-02               | 1.E+02               |
| Th-227+                    | 8.E-02          | 2.E-01               | 8.E-02               |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Valor D               | Valor D <sub>1</sub>  | Valor D <sub>2</sub>  |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                            | (TBq)                 | (TBq)                 | (TBq)                 |
| Th-228+                    | 4.E-02                | 5.E-02                | 4.E-02                |
| Th-229+                    | 1.E-02                | 2.E-01                | 1.E-02                |
| Th-230+                    | 7.E-02 <sup>d</sup>   | 9.E+02                | 7.E-02 <sup>d</sup>   |
| Th-231                     | 1.E+01                | 1.E+01                | 3.E+02                |
| Th-232+                    | UL <sup>e</sup>       | UL                    | UL <sup>e</sup>       |
| Th-234+                    | 2.E+00                | 2.E+00                | 2.E+00                |
| Pa-230+                    | 1.E-01                | 1.E-01                | 9.E-01                |
| Pa-231+                    | 6.E-02                | 8.E-01                | 6.E-02                |
| Pa-233                     | 4.E-01                | 4.E-01                | 8.E+00                |
| U-230+                     | 4.E-02                | 4.E+00                | 4.E-02                |
| U-232+                     | 6.E-02 <sup>d</sup>   | 7.E-02                | 6.E-02 <sup>d</sup>   |
| U-233                      | 7.E-02 <sup>f</sup>   | 7.E-02 <sup>f</sup>   | 7.E-02 <sup>d,f</sup> |
| U-234+                     | 1.E-01 <sup>f</sup>   | 1.E-01 <sup>f</sup>   | 1.E-01 <sup>d,f</sup> |
| U-235+                     | 8.E-05 <sup>f</sup>   | 8.E-05 <sup>f</sup>   | 8.E-05 <sup>f</sup>   |
| U-236                      | 2.E-01 <sup>d</sup>   | UL                    | 2.E-01 <sup>d</sup>   |
| U-238+                     | UL <sup>e</sup>       | UL                    | UL <sup>e</sup>       |
| U Natural                  | UL <sup>e</sup>       | UL                    | UL <sup>e</sup>       |
| U Empobrecido              | UL <sup>e</sup>       | UL                    | UL <sup>e</sup>       |
| U Enriquecido<br>10-20%    | 8E-04 <sup>f</sup>    | 8E-04 <sup>f</sup>    | 8E-04 <sup>f</sup>    |
| U Enriquecido<br>>20 %     | 8E-05 <sup>f</sup>    | 8E-05 <sup>f</sup>    | 8E-05 <sup>f</sup>    |
| Np-235                     | 1.E+02                | 1.E+02                | 2.E+02                |
| Np-236b+                   | 7.E-03                | 7.E-03 <sup>f</sup>   | 7.E-03 <sup>f</sup>   |
| Np-236a                    | 8.E-01                | 8.E-01                | 7.E+00                |
| Np-237+                    | 7.E-02                | 3.E-01 <sup>f</sup>   | 7.E-02 <sup>d</sup>   |
| Np-239                     | 5.E-01                | 5.E-01                | 6.E+01                |
| Pu-236                     | 1.E-01                | 1.E+00                | 1.E-01                |
| Pu-237                     | 2.E+00                | 2.E+00                | 6.E+01                |
| Pu-238                     | 6.E-02                | 3.E+02 <sup>f</sup>   | 6.E-02                |
| Pu-239                     | 6.E-02                | 1.E+00 <sup>f</sup>   | 6.E-02                |
| Pu-240                     | 6.E-02                | 4.E+00 <sup>f</sup>   | 6.E-02                |
| Pu-241+                    | 3.E+00                | 2.E+03 <sup>f</sup>   | 3.E+00                |
| Pu-242                     | 7.E-02 <sup>d,f</sup> | 7.E-02 <sup>d,f</sup> | 7.E-02 <sup>d,f</sup> |
| Pu-244+                    | 3.E-04 <sup>d,f</sup> | 3.E-04 <sup>f</sup>   | 3.E-04 <sup>d,f</sup> |
| Am-241                     | 6.E-02                | 8.E+00                | 6.E-02                |
| Am-242m+                   | 3.E-01                | 1.E+00 <sup>f</sup>   | 3.E-01                |
| Am-243+                    | 2.E-01                | 4.E-01                | 2.E-01                |
| Am-244                     | 9.E-02                | 9.E-02                | 9.E+01                |
| Cm-240                     | 3.E-01                | 1.E+00                | 3.E-01                |
| Cm-241+                    | 1.E-01                | 1.E-01                | 7.E+00                |
| Cm-242                     | 4.E-02                | 2.E+03                | 4.E-02                |
| Cm-243                     | 2.E-01                | 6.E-01                | 2.E-01                |

| Radionucleido <sup>a</sup>         | Valor D             | Valor D <sub>1</sub>   | Valor D <sub>2</sub> |
|------------------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|
|                                    | (TBq)               | (TBq)                  | (TBq)                |
| Cm-244                             | 5.E-02              | 1.E+04 <sup>f</sup>    | 5.E-02               |
| Cm-245                             | 9.E-02 <sup>f</sup> | 9.E-02 <sup>f</sup>    | 9.E-02 <sup>f</sup>  |
| Cm-246                             | 2.E-01              | 6.E+00 <sup>f</sup>    | 2.E-01               |
| Cm-247                             | 1.E-03 <sup>f</sup> | 1.E-03 <sup>f</sup>    | 1.E-03 <sup>f</sup>  |
| Cm-248                             | 5.E-03              | 5.E-03                 | 7.E-02 <sup>d</sup>  |
| Bk-247                             | 8.E-02              | 8.E-02 <sup>f</sup>    | 8.E-02 <sup>f</sup>  |
| Bk-249                             | 1.E+01              | 1.E+01                 | 4.E+01               |
| Cf-248+                            | 1.E-01              | 1.E+02 <sup>f</sup>    | 1.E-01               |
| Cf-249                             | 1.E-01              | 2.E-01                 | 1.E-01               |
| Cf-250                             | 1.E-01              | 4.E-01                 | 1.E-01               |
| Cf-251                             | 1.E-01              | 7.E-01                 | 1.E-01               |
| Cf-252                             | 2.E-02              | 2.E-02                 | 1.E-01               |
| Cf-253                             | 4.E-01              | 1.E+01                 | 4.E-01               |
| Cf-254                             | 3.E-04              | 3.E-04                 | 2.E-03               |
| <sup>239</sup> Pu/ <sup>9</sup> Be | 6.E-02 <sup>g</sup> | 1.E+00 <sup>f, g</sup> | 6.E-02 <sup>g</sup>  |
| <sup>241</sup> Am/ <sup>9</sup> Be | 6.E-02 <sup>g</sup> | 1.E+00 <sup>g</sup>    | 6.E-02 <sup>g</sup>  |

<sup>a</sup> Al calcular los valores D de todos los radionucleidos se tuvo en cuenta el aumento interno de la progenie radiactiva tal como se señala en el Apéndice VIII. El símbolo ‘+’ indica los radionucleidos en cuyo caso la progenie supuso fuentes significativas de dosis en los escenarios considerados.

<sup>b</sup> “UL” – Sigla en inglés de “unlimited quantity”, cantidad ilimitada, como se define en el Apéndice II.

<sup>c</sup> La fracción incorporada de <sup>3</sup>H se duplicó para tener en cuenta la absorción cutánea de material dispersado. Fue una hipótesis conservadora basada en datos de la Publicación 71 de la CIPR [7] que sugieren que, en situaciones de contaminación atmosférica por agua tritiada (HTO), la absorción a través de la piel constituye aproximadamente 1/3 de la incorporación por inhalación.

<sup>d</sup> Las emergencias en las que estén presentes estas cantidades de radionucleidos pueden dar lugar a concentraciones atmosféricas que excedan el nivel considerado como de peligro inmediato para la vida o la salud (PIVS). Para más detalles véase el Apéndice VIII.

<sup>e</sup> Las emergencias en las que estén presentes grandes cantidades de esos radionucleidos pueden dar lugar a concentraciones atmosféricas que excedan el nivel considerado como de peligro inmediato para la vida o la salud (PIVS). Para más detalles véase el Apéndice VIII.

<sup>f</sup> El valor D se basa en el examen del límite de criticidad de masa. Para más detalles véase el Apéndice VIII.

<sup>g</sup> La actividad indicada es la del radionucleido emisor alfa, por ejemplo, el <sup>239</sup>Pu o el <sup>241</sup>Am.

### 3. EFECTOS EN LA SALUD CONSIDERADOS

El valor D es la cantidad de material radiactivo que, si no está bajo control, podría causar la muerte de una persona expuesta o una lesión permanente que mermase su calidad de vida. Estos efectos son conocidos como efectos deterministas graves en la salud. Los efectos deterministas graves suelen producirse poco después de la exposición. Su gravedad es mayor cuanto más alta sea la dosis recibida; hay un umbral efectivo de dosis por debajo del cual no se producen en absoluto.

Al calcular los valores D se consideraron dos tipos de efectos deterministas graves en la salud: los letales y los no letales:

- Efectos letales son aquellos que, si se producen, conducen a la muerte. La experiencia [8, 9] y la investigación demuestran que las muertes por exposición a radiación son, en última instancia, resultado de fallos multiorgánicos. No obstante, los órganos y tejidos aquí tratados fueron seleccionados porque el daño a los mismos se considera crítico en toda emergencia radiológica o nuclear. Dicho de otro modo, si se mantiene la dosis de

exposición por debajo de la dosis umbral en esos órganos, se evita la muerte del individuo expuesto.

- b) Efectos no letales son aquellos que merman la calidad de vida y que son específicos de cada órgano o tejido.

Los valores de dosis umbral o de referencia utilizados para indicar cuándo cabría esperar efectos deterministas graves y los métodos dosimétricos empleados para calcular la dosis en diversos escenarios de exposición se describen en el Apéndice I.

### **3.1 EFECTOS DETERMINISTAS LETALES EN LA SALUD**

*Médula roja y colon.* La exposición de la médula roja (sistema hematopoyético) o del colon (tracto gastrointestinal) puede dar lugar a efectos que pongan en peligro la vida o que sean letales. Esto puede producirse por exposición de todo el cuerpo a una fuente externa o por exposición interna a raíz de una ingestión o inhalación. En el caso de exposición externa, los efectos en la médula roja serán los críticos. Tras una incorporación, los efectos radiológicos inducidos en la médula roja o en el colon podrían ser críticos, lo que dependerá del radionucleido y su forma física.

*Regiones pulmonares.* La exposición del pulmón a raíz de una inhalación es crítica en el caso de la mayoría de los radionucleidos, pero puede depender de la forma física (p. ej. la solubilidad) del material inhalado. La exposición del pulmón puede dar lugar a un efecto letal (neumonitis) y también a efectos que merman la calidad de vida (fibrosis pulmonar). En este caso se supuso que el desarrollo de fibrosis pulmonar sería, en última instancia, letal.

*Regiones cutáneas.* Las manifestaciones clínicas de los efectos deterministas por exposición de la piel empiezan con el eritema y pueden ser seguidos por epilación, descamación seca y húmeda, formación de ampollas, ulceración y necrosis, según la dosis recibida. El eritema no es considerado un efecto determinista grave en la salud. La descamación húmeda y fases posteriores más graves de lesiones en la piel se consideran efectos deterministas graves en la salud. La gravedad de la lesión depende no solo de la dosis y el tipo de radiación, sino también de la ubicación y la extensión de la zona expuesta. La descamación húmeda de una zona extensa (superior a 100 cm<sup>2</sup>) de la superficie de la piel se considera potencialmente letal, especialmente si se combina con otras lesiones o exposiciones, como les sucedió a los bomberos que actuaron en el accidente de Chernóbyl.

### **3.2 EFECTOS DETERMINISTAS NO LETALES EN LA SALUD**

*Tejido blando.* La exposición externa por el transporte en la mano o en el bolsillo de una fuente sin blindaje puede causar necrosis localizada (muerte del tejido). Esta es la causa más común de efectos deterministas graves en la salud inducidos por radiación en el caso de las fuentes radiactivas incontroladas (robadas o perdidas). Aún cuando la necrosis local de un tejido blando no pone normalmente en peligro la vida, sí puede causar pérdida de función (p. ej. de la mano) o lesiones que requieran cirugía reconstructiva. Experiencias clínicas anteriores en el tratamiento de lesiones de tejido blando indican que la necrosis en una zona de 50 a 100 cm<sup>2</sup> y con una profundidad de 0,5 cm requiere múltiples operaciones quirúrgicas y se considera, por tanto, un efecto determinista grave en la salud. La experiencia también indica que la necrosis en la mano con una profundidad de 0,1 a 0,2 cm puede ocasionar la pérdida de funciones y se considera, por tanto, un efecto determinista grave en la salud.

*Tiroides.* Como ejemplos de efectos deterministas en la salud a raíz de una irradiación de la tiroides cabe citar la tiroiditis por radiación aguda (caracterizada por la inflamación y necrosis del tejido tiroideo) y el hipotiroidismo (estado metabólico anormal debido a la producción de hormonas tiroideas en cantidades insuficientes para una función fisiológica normal). Estos efectos no son generalmente letales si se tratan adecuadamente. Ahora bien, el tratamiento suele requerir la toma de medicamentos sustitutivos de hormonas durante toda la vida. Por consiguiente, las lesiones de la tiroides inducidas

por radiación se consideraron efectos deterministas graves en la salud, dado que merman la calidad de vida.

*Cristalino.* El cristalino es especialmente sensible a la radiación, lo que da lugar a la posterior aparición de opacidades o formación de cataratas en el mismo. Se ha constatado que las cataratas son un efecto tardío en la salud en los supervivientes de la bomba atómica y en muchas exposiciones accidentales. Pueden ocasionar ceguera o, como mínimo, visión deteriorada y se consideran un efecto determinista grave en la salud.

*Órganos reproductores.* Como ejemplos de efectos deterministas en la salud derivados de la exposición de los órganos reproductores cabe citar la esterilidad temporal o permanente, y la inhibición de la ovulación o de la producción de esperma. La esterilidad permanente y la inhibición permanente de la ovulación o de la producción de esperma se consideran efectos deterministas graves en la salud porque en muchos casos mermarían la calidad de vida.

*Embrión y feto.* Entre los efectos deterministas no letales en la salud causados por la exposición fetal se encuentran el aumento de las malformaciones y el deterioro del desarrollo mental por encima de la incidencia de referencia. La mayor parte de estos efectos tienen un umbral superior a los 100 a 200 mGy. No obstante, durante el periodo de 8 a 25 semanas consecutivo a la concepción, una dosis fetal de 100 mGy o mayor puede causar una reducción verificable del cociente intelectual (CI). Que una mujer embarazada se vea afectada por una emergencia radiológica durante el periodo más sensible del desarrollo del feto es, probablemente, muy poco frecuente, y la consideración de esos efectos tendría como resultado valores  $D_1$  en torno a un factor 10 más restrictivos que los calculados en base a todos los demás efectos deterministas graves en la salud. La utilización de tales valores sería muy conservadora para la gran mayoría de emergencias radiológicas potenciales. Por lo tanto, al establecer los valores D, se decidió no considerar los efectos no letales de la exposición del embrión y del feto.

#### **4. ESCENARIOS Y VÍAS DE EXPOSICIÓN**

Para determinar los valores D se examinó un número limitado de escenarios que podrían dar lugar a exposiciones de seres humanos como consecuencia de la pérdida de control sobre una fuente. Estos escenarios y supuestos se elaboraron teniendo en cuenta experiencias previas<sup>2</sup> y otros problemas relevantes, como el uso doloso de material radiactivo (p. ej. en un dispositivo de dispersión radiológica (DDR)). En el Cuadro 2 se resumen los escenarios considerados, que se detallan en el Apéndice II.

---

<sup>2</sup> Véase el Apéndice VII.

CUADRO 2. ESCENARIOS CONSIDERADOS PARA DETERMINAR LOS VALORES D

| Órganos o tejido    | Valor D <sub>1</sub><br>Material no dispersado |            | Valor D <sub>2</sub><br>Material dispersado |           |                            |           |
|---------------------|--|------------|---|-----------|----------------------------|-----------|
|                     | Bolsillo                                       | Habitación | Inhalación                                  | Ingestión | Contaminación <sup>a</sup> | Inmersión |
|                     | (I)  | (II)       | (III)                                       | (IV)      | (V)                        | (VI)      |
| Médula roja         |  | ●          | ●   | ●         |                            | ●         |
| Colon               |  | ●          | ●   | ●         |                            | ●         |
| Regiones pulmonares |  | ●          | ●   | ●         |                            | ●         |
| Regiones cutáneas   |  |            |   |           | ●                          |           |
| Tejido blando       | ●  |            |   |           |                            |           |
| Tiroides            |  | ●          | ●   | ●         |                            | ●         |
| Cristalino          |  | ●          |   |           |                            | ●         |
| Reproductores       |  | ●          |   |           |                            | ●         |

<sup>a</sup> Contaminación de la piel

Al calcular los valores D<sub>1</sub> para materiales no dispersados se tuvieron en cuenta los siguientes escenarios:

- el escenario “bolsillo” (Escenario I), en el cual se supuso que la persona transportaba una fuente no blindada, con el resultado de daño localizado de tejido blando; y
- el escenario “habitación” (Escenario II), en el cual se supuso que una persona se encontraba cerca de una fuente no blindada durante varios días o semanas, con el resultado de una exposición de todo el cuerpo a radiación externa penetrante.

Al calcular los valores D<sub>2</sub> para materiales dispersados se tuvieron en cuenta los siguientes escenarios:

- el escenario “inhalación” (Escenario III), en el que se supuso que había un incendio o una explosión (p. ej. de un DDR) por los que alguien quedaba expuesto a material radiactivo en suspensión atmosférica;
- el escenario “ingestión” (Escenario IV), en el que se adoptó el más restrictivo de dos escenarios. En el primero se suponía que la fuente presentaba fugas y era manipulada, con el resultado de ingestión involuntaria del material. En el segundo, el supuesto era que la fuente se introducía en un sistema de suministro público de agua, lo que causaba la contaminación de la misma, que era después ingerida;
- el escenario “contaminación” (Escenario V), en el que se supuso que la piel se contaminaba debido a una fuente que presentaba fugas;
- el escenario “inmersión” (Escenario VI) para la exposición a gases nobles, en el que se supuso que la actividad quedaba liberada en una habitación, con la consiguiente exposición de sus ocupantes. En este caso sólo se consideró la exposición externa de la médula roja.

Los supuestos concretos utilizados para deducir los valores D específicos de cada radionucleido se establecieron de modo que haya una confianza razonable en que:

- portar o llevar (p. ej. en un bolsillo) una cantidad inferior de ese material radiactivo sin blindaje no debería causar una lesión que mermase la calidad de vida;
- tener en casa o en el lugar de trabajo una cantidad inferior de ese material radiactivo sin blindaje no debería dar lugar a una exposición que pusiese en peligro la vida o pudiese causar una lesión que redujese la calidad de vida;

- c) una dispersión atmosférica originada por un incendio o una explosión que afectase a una cantidad inferior de ese material radiactivo no debería causar lesiones por inhalación que pusiesen en peligro la vida o mermasen la calidad de vida;
- d) la manipulación de un contenedor que tuviera alguna rotura y encerrara una cantidad inferior de ese material dispersable no debería dar por resultado una ingestión involuntaria o contaminación de la piel que pusiese en peligro la vida o pudiese causar una lesión que mermase la calidad de vida;
- e) una fuente que contuviese una cantidad inferior de ese material dispersable introducida en un sistema de suministro público de agua no debería causar ningún efecto determinista grave por consumo de agua; y
- f) una fuente que contuviese una cantidad inferior de ese material radiactivo no podría alcanzar un estado crítico.

## 5. CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE UNA FUENTE

Esta sección trata de las características del material de una fuente que son de importancia al determinar el valor D. Este tema se aborda con mayor detalle en el Apéndice VIII.

*Desintegración y aumento interno.* Una fuente radiactiva tiene una vida que comienza cuando la fuente que se fabrica y finaliza cuando la fuente es clausurada y acondicionada como desecho radiactivo. Las propiedades físicas de la fuente varían durante ese periodo de tiempo. La actividad de un radionucleido predecesor en el momento de la fabricación (actividad inicial) decrece debido a la desintegración, pero puede haber un incremento de la actividad de otros radionucleidos (denominados progenie o descendientes), como resultado de la desintegración, lo que a menudo se conoce como aumento interno. Para la mayoría de los radionucleidos el peligro disminuye con la edad de la fuente debido a la reducción de su actividad total. Sin embargo, en algunas cadenas de desintegración de radionucleidos (p. ej.  $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$ ) los radionucleidos descendientes son, para algunas vías, más tóxicos radiológicamente que el predecesor y, por tanto, el peligro puede aumentar con la edad de la fuente. El momento en que una fuente pueda resultar afectada en una emergencia es impredecible y, por consiguiente, la actividad de la fuente cuando se produce una emergencia es igualmente impredecible. Para tenerlo en cuenta, los valores D se calcularon a partir de la mezcla más peligrosa de radionucleidos predecesor y descendientes en cualquier momento durante un periodo de 10 años. No obstante, los valores D se expresan en términos de la “actividad inicial” (actividad previa al aumento interno) del radionucleido predecesor contenido en la fuente. En el Apéndice VIII se exponen en detalle las consideraciones a este respecto.

*La radiación nuclear y sus interacciones.* Las transformaciones nucleares<sup>3</sup> de un radionucleido pueden generar distintas radiaciones ionizantes. A efectos de este informe son dos los grupos de radiaciones importantes: las radiaciones de alta transferencia lineal de energía (TLE), tales como las partículas alfa y los neutrones, y las de baja TLE, como las partículas beta y los fotones.

- a) Los radionucleidos emisores de fotones constituyen un peligro tanto interno como externo. Los fotones son uno de los tipos de radiación más penetrantes, ya que son capaces de recorrer sin interacción muchos metros en aire y atravesar muchos centímetros en el cuerpo humano. La dispersión de fotones en aire (el efecto de brillo celeste) no es un factor que contribuya significativamente a la dosis de una fuente situada a solo un metro del cuerpo. Por tanto, no se la tuvo en cuenta al calcular los valores  $D_1$ . No obstante, se analizó la dispersión múltiple de fotones dentro del cuerpo humano en los cálculos dosimétricos.
- b) Los neutrones pierden energía por interacciones con núcleos ligeros principalmente. Por tanto, pueden penetrar varios metros en el plomo, pero son detenidos con efectividad por el agua o el tejido blando del cuerpo humano. La interacción de los neutrones con la materia a

---

<sup>3</sup> También denominadas “desintegración radiactiva”.

menudo produce núcleos de retroceso y fotones secundarios. Por consiguiente, las fuentes emisoras de neutrones constituyen un peligro tanto interno como externo. Los radionucleidos fisionables espontáneamente (p. ej. el  $^{252}\text{Cf}$ ) son una fuente de neutrones. Además, algunas mezclas densas de radionucleidos emisores alfa (p. ej. el  $^{239}\text{Pu}$  y el  $^{241}\text{Am}$ ) y el Be, C, N, O o F pueden ser una fuente de neutrones mediante la reacción ( $\alpha, n$ ). Las fuentes que contienen  $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$  y  $^{239}\text{Pu}/^9\text{Be}$  se utilizan frecuentemente como fuentes de neutrones en aplicaciones comerciales y científicas, y pueden ser una causa importante de exposición externa. Sin embargo, el tamaño de las partículas que se pueden inhalar o ingerir por la dispersión del material de estas fuentes de neutrones sería demasiado pequeño como para producir emisiones de neutrones mediante la reacción ( $\alpha, n$ ) de manera efectiva. Luego para las fuentes de  $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$  y  $^{239}\text{Pu}/^9\text{Be}$ , los valores  $D_1$  se calcularon incluyendo la exposición externa debida a los neutrones producidos por la reacción ( $\alpha, n$ ), pero los valores  $D_2$  no incluyen ninguna contribución a la dosis debida a la producción de neutrones después de la incorporación.

- c) Las partículas beta de alta energía pueden recorrer varios metros en aire, pero apenas pueden penetrar la piel y unos milímetros de tejido blando. Por consiguiente, los radionucleidos emisores beta se consideran normalmente un peligro interno solo a raíz de una incorporación, o un peligro para la piel después de una contaminación de la misma. Sin embargo, si las partículas beta de alta energía interaccionan con material de número atómico alto ( $Z$ ), una parte significativa de su energía puede convertirse en fotones de radiación de frenado. Las fuentes que contienen radionucleidos emisores de grandes cantidades de partículas beta de alta energía (p. ej. el  $^{90}\text{Sr}$ ) podrían ser, por lo tanto, una fuente significativa de radiación penetrante, lo que supondría un riesgo de exposición externa. Por consiguiente, la dosis externa debida a la radiación de frenado se consideró al calcular los valores  $D_1$ . La producción de radiación de frenado es insignificante si las partículas beta de alta energía interaccionan con material de  $Z$  bajo, p. ej. tejidos blandos del cuerpo humano. Por tanto, este efecto no se consideró en el cálculo de los valores  $D_2$  que caracterizan la exposición humana a raíz de una incorporación.
- d) Las partículas alfa son las menos penetrantes de las radiaciones ionizantes. Pueden ser detenidas por las capas externas de la piel y normalmente solo son un riesgo para la salud después de que el material emisor alfa entre en el cuerpo. En algunas circunstancias las partículas alfa pueden interaccionar con núcleos ligeros produciendo neutrones mediante la reacción ( $\alpha, n$ ), como se ha mencionado anteriormente.

*Limitación de la criticidad.* Algunos radionucleidos son capaces de mantener una reacción en cadena, lo que representaría un problema tanto de seguridad física como de seguridad tecnológica. Cuando la masa de la actividad considerada peligrosa, calculada según uno de los escenarios de exposición, era superior al límite establecido para prevenir la criticidad, se utilizó la actividad correspondiente al límite de criticidad de esa masa para establecer el valor  $D$ .

*Limitación de la toxicidad química.* La liberación en el aire de cualquier sustancia resulta peligrosa para la salud humana debido a su toxicidad química y a otros factores, caso de que la concentración de esa suspensión sea lo suficientemente elevada. Hay algunos radionucleidos que, debido a su baja actividad específica, tienen valores  $D$  para los cuales la masa de una suspensión en el aire puede ser potencialmente peligrosa por motivos no radiológicos, por ejemplo, por toxicidad química. La evaluación del riesgo de exposición debido a efectos no radiológicos queda fuera del alcance de esta publicación. No obstante, se señala cuándo existe este potencial para el valor  $D$  de un radionucleido concreto.

## 6. ENFOQUES PARA EL CÁLCULO DE LOS VALORES D

Se utilizaron dos enfoques distintos para calcular los valores D, denominados en este informe enfoques experto y riesgo:

- a) El enfoque experto para el cálculo de valores D se basó en datos fácilmente accesibles, el análisis de directrices existentes [10, 11] y el criterio profesional. Se hizo así para satisfacer a corto plazo una necesidad acuciante de determinados valores D. El enfoque experto se utilizó para calcular los valores D correspondiente a una serie de radionucleidos [2, 3] de mayor interés.
- b) El enfoque riesgo para el cálculo de valores D se basó en una evaluación cuantitativa del riesgo de generar efectos deterministas graves. Los modelos utilizados en este enfoque se basaron en estudios de duración de vida [12, 13, 14] y en un examen riguroso de los datos y modelos más recientes. En la Ref. [15] se documenta el desarrollo completo de este enfoque para la respuesta a emergencias. Dicho enfoque se utilizó en este trabajo para calcular los valores D de una lista ampliada de radionucleidos, entre otros, de aquellos no tratados en las Refs. [2, 3, 4], y para evaluar la idoneidad de los valores D calculados según el anterior enfoque experto.

Los algoritmos utilizados para el cálculo de los valores D se describen en el Apéndice III.

Como se indica en el Apéndice VII, se comprobó que los valores D calculados mediante el enfoque experto concordaban satisfactoriamente con los calculados posteriormente mediante el enfoque riesgo. Por consiguiente, no fue necesario revisar los valores D que figuran en las Refs. [2, 3, 4]. Los resultados de ambos enfoques se combinaron en un único conjunto de valores D recomendados, que se presentan en el Cuadro 1.

## APÉNDICES



## APÉNDICE I

### NIVELES DE REFERENCIA Y UMBRAL PARA LA APARICIÓN DE EFECTOS DETERMINISTAS

En el enfoque experto la dosis a la que se supuso que podría darse un efecto determinista grave se denomina nivel de referencia. Esto se debe a que el nivel se basó en el criterio de un experto sobre las dosis que son cercanas pero inferiores a la dosis umbral real. En el enfoque riesgo el nivel de dosis al que se supuso que podría darse un efecto determinista grave se denomina nivel umbral. Este nivel se calculó de modo que fuese la dosis a la que cabría esperar que apareciese dicho efecto en un 5% de las personas expuestas.

El Cuadro 3 muestra la lista de órganos y tejidos [15] que se analizaron al establecer los valores D. Para cada tejido se especifica un número de referencia, el cual se emplea en toda esta publicación para identificar el órgano o tejido.

Existen dos números de referencia distintos para el pulmón (3E y 3R) ya que en los enfoques experto y riesgo se tomaron diferentes regiones del pulmón como órgano blanco. En el enfoque experto se empleó la dosis absorbida al "pulmón" siendo la "dosis al pulmón" la suma ponderada de la dosis absorbida a los distintos tejidos de la región torácica del tracto respiratorio, como recomienda la publicación CIPR-66 [16] para la evaluación de los efectos estocásticos. Se la denomina "región torácica del tracto respiratorio". Como recomienda la Ref. [15], el enfoque riesgo utilizó la dosis a la región alveolar-intersticial (AI) del tracto respiratorio como órgano blanco.

Se utilizan dos números de referencia diferentes para la piel (6E y 6R) ya que en los enfoques experto y riesgo se tomaron regiones distintas de la piel como órgano blanco. En el enfoque experto se tomó la membrana basal de la piel (a una profundidad de 70  $\mu\text{m}$  bajo la superficie) porque se disponía con facilidad de factores de dosis para esa región. La CIPR y la CIUMR [17, 18, 19] han recomendado que la dosis a la dermis de la piel (300-500  $\mu\text{m}$  bajo la superficie) sea evaluada a fin de estimar efectos deterministas graves tales como la descamación húmeda. Este fue el método utilizado en el enfoque riesgo, donde se supuso que el desarrollo de efectos deterministas graves es consecuencia de una irradiación de más de 100  $\text{cm}^2$  del tejido cutáneo [12] situado a una profundidad de 400  $\mu\text{m}$  ( $40 \text{ mg} \times \text{cm}^{-2}$ ).

En ambos enfoques, tanto en la Ref. [15] como en la presente publicación, se utiliza el "torso" para simplificar el tratamiento de la exposición externa a un campo uniforme de radiación muy penetrante procedente de una fuente a distancia. El "torso" comprende el pulmón, la médula roja, el intestino delgado, las gónadas, la tiroides y el cristalino. La exposición del "torso" a una fuente distante externa afectaría a todos estos órganos y no es necesario, por tanto, analizarlos por separado.

CUADRO 3. ÓRGANOS Y TEJIDOS CONSIDERADOS

| Órgano o tejido           | Vía de exposición        | Número de referencia del tejido |                |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------|
|                           |                          | Enfoque experto                 | Enfoque riesgo |
| Tejido blando             | Fuente externa adyacente | 1                               | 1              |
| Médula roja               | Interna                  | 2                               | 2              |
| Regiones pulmonares       | Interna                  | 3E                              | 3R             |
| Colon o intestino delgado | Interna                  | 4                               | 4              |
| Tiroides                  | Interna                  | 5                               | 5              |
| Regiones de la piel       | Contacto con la piel     | 6E                              | 6R             |
| Torso <sup>a</sup>        | Fuente externa distante  | 7                               | 7              |
| Médula roja               | Fuente externa distante  | Véase nota b                    | Véase nota b   |
| Tiroides                  | Fuente externa distante  | Véase nota b                    | Véase nota b   |
| Cristalino                | Fuente externa distante  | Véase nota b                    | Véase nota b   |
| Óvulo (mujeres)           | Fuente externa distante  | Véase nota b                    | Véase nota b   |
| Testículos (hombres)      | Fuente externa distante  | Véase nota b                    | Véase nota b   |

<sup>a</sup> El torso se utiliza para simplificar el tratamiento de los efectos de la exposición externa debida a una fuente distante y comprende la médula roja, la tiroides, el cristalino y los órganos reproductores.

<sup>b</sup> La dosis umbral para el desarrollo de efectos deterministas graves causada por una fuente externa distante en este órgano es inferior al nivel de referencia o al nivel umbral de dosis en el torso; por consiguiente, no se realizó un cálculo específico de la dosis a este órgano.

### I.1. MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS UTILIZADAS EN LA CARACTERIZACIÓN DE LOS EFECTOS DETERMINISTAS

Los efectos biológicos de la radiación están correlacionados con la energía absorbida debido a la ionización y la excitación por unidad de masa de tejido (dosis absorbida de radiación). Son modificados por la distribución espacial microscópica de la energía impartida, que define la calidad de la radiación. Este factor depende de la transferencia lineal de energía (TLE) de la radiación. Se consideran normalmente dos tipos de radiación en el contexto del desarrollo de los efectos de la radiación en la salud:

- a) Radiación de baja TLE; y
- b) Radiación de alta TLE.

Los efectos biológicos de la radiación pueden ser modificados también por la tasa de absorción de energía (tasa de dosis absorbida), la concentración de oxígeno en el tejido así como otros factores que determinan la radiosensibilidad del tejido biológico afectado.

En los enfoques experto y riesgo se emplean magnitudes dosimétricas diferentes al evaluar las exposiciones que pueden ocasionar efectos deterministas para la salud en los órganos o tejidos críticos. Estas magnitudes se enumeran en el cuadro 4 y se muestran en la fig. 1 junto a otras magnitudes utilizadas habitualmente en el ámbito de la protección radiológica.

CUADRO 4. MAGNITUDES DOSIMÉTRICAS UTILIZADAS PARA EVALUAR LOS EFECTOS DE LA RADIACIÓN EN LA SALUD

| Objetivo y magnitud dosimétrica  | Símbolo         | Unidad | Exposición |
|--|-----------------|--------|------------|
| Evaluación de los efectos deterministas:   |                 |        |            |
| a) Enfoque experto   |                 |        |            |
| Dosis absorbida causada por la radiación R en un órgano o tejido T <sup>b</sup>              | $D_T^R$         | Gy     | Externa    |
| Dosis absorbida comprometida causada por la radiación R en un órgano o tejido T <sup>b</sup> | $D_T^R(\Delta)$ | Gy     | Interna    |
| b) Enfoque riesgo  |                 |        |            |
| Dosis ponderada según EBR <sup>c</sup> en un órgano o tejido T                               | $AD_T$          | Gy-Eq  | Externa    |
| Dosis ponderada según EBR <sup>c</sup> comprometida en un órgano o tejido T                  | $AD_T(\Delta)$  | Gy-Eq  | Interna    |
| Evaluación de los efectos estocásticos:  |                 |        |            |
| Dosis de radiación ponderada en un órgano o tejido T   | $H_T$           | Sv     | Externa    |
| Dosis de radiación ponderada comprometida en un órgano o tejido T                            | $H_T(\Delta)$   | Sv     | Interna    |

<sup>a</sup> Puede verse una descripción de los símbolos y los índices utilizados en esta publicación en los Anexos I y II.

<sup>b</sup> La indexación de la dosis de radiación absorbida específica introducida por la CIPR [20] se modificó ligeramente a los efectos de este informe.

<sup>c</sup> Eficacia biológica relativa, tratada más adelante.

La dosis absorbida en un órgano o tejido es la magnitud dosimétrica básica. La dosis absorbida,  $(D_T^R)^4$ , es igual a la energía de la radiación ionizante R impartida a una unidad de masa del órgano o tejido T y se define como

$$D_T^R = \frac{\Delta \epsilon_R}{m_T}, \quad (1)$$

donde:

$m_T$  es la masa del órgano o tejido T; y

$\Delta \epsilon_R$  es la energía de la radiación ionizante R impartida a la masa del órgano o tejido dado.

La dosis absorbida comprometida  $D_T(\Delta)$  en el órgano o tejido T se define como la integral en el tiempo de la tasa de dosis absorbida en el órgano o tejido en el tiempo  $\Delta$  siguiente a la incorporación del material radiactivo y viene dada por:

$$D_T^R(\Delta) = \int_{t_0}^{t_0+\Delta} \dot{D}_T^R(t) dt = \sum_S I_S \times DF_{T,S}^R(\Delta), \quad (2)$$

donde:

<sup>4</sup> Puede verse una descripción completa de los símbolos y los índices utilizados en esta publicación en el Anexo I.

$t_0$  es el tiempo de la incorporación;

$\Delta$  es el periodo de integración, también denominado periodo de compromiso;

$\dot{D}_T^R(t)$  es la tasa de dosis absorbida de la radiación R en el órgano o tejido T en el tiempo t siguiente a la incorporación de un radionucleido, Gy/s;

$I_S$  es la actividad de la incorporación de un radionucleido a través de una vía determinada por el escenario S, (Bq); y

$DF_{T,S}^R(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis igual a la dosis absorbida a causa de la radiación R en el órgano o tejido T, comprometida según el escenario S durante el intervalo de tiempo  $\Delta$  siguiente a la incorporación de 1 Bq de un radionucleido, (Gy/Bq).

La unidad de dosis absorbida y de dosis absorbida comprometida es el gray (Gy) [20].

Al evaluar la exposición externa a la radiación R (de baja TLE o de alta TLE), en el enfoque experto se utilizó la dosis absorbida en el órgano  $D_T^R$ . Para evaluar la exposición interna se utilizó la dosis absorbida comprometida en el órgano o tejido,  $D_T^R(\Delta)$ . En el enfoque experto los componentes de la dosis absorbida producida por la radiación de baja TLE y por la de alta TLE se trataron de manera diferente según la vía de exposición, el órgano y las características del material radioactivo.

En el enfoque riesgo los componentes de la dosis absorbida producida por la radiación de baja TLE y la de alta TLE fueron ponderados según la eficacia biológica relativa (EBR) y tratados conjuntamente. Al evaluar la exposición externa, en el enfoque riesgo se utilizó una dosis ponderada según EBR en un órgano o tejido,  $AD_T$  [15, 21]. Para evaluar la exposición interna se utilizó la dosis ponderada según EBR comprometida en un órgano o tejido,  $AD_T(\Delta)$ . La dosis ponderada según EBR ( $AD_T$ ) se define como el producto de la dosis absorbida en un órgano o tejido,  $D_T^R$ , y la eficacia biológica relativa denotada por su sigla en inglés RBE,  $RBE_T^R$ , y viene dada por:

$$AD_T = \sum_R D_T^R \times RBE_T^R . \quad (3)$$

Para un órgano o tejido concreto T, la  $RBE_T^R$  es la relación entre la dosis absorbida debida a una radiación de referencia que produce un efecto biológico especificado y la dosis absorbida debido a la radiación de interés R que produce el mismo efecto biológico. El valor de  $RBE_T^R$  depende del efecto en el órgano o tejido afectado, del estado biológico que se analice, y de la calidad de la radiación que produce la dosis absorbida. La calidad de la radiación depende de muchos factores; los más importantes son la transferencia lineal de energía (TLE) y la capacidad de penetración de la radiación. Según sea la microdistribución de los radionucleidos emisores de radiaciones poco penetrantes, el valor de  $RBE_T^R$  será diferente para la exposición interna y externa causada por una radiación con el mismo valor de TLE.

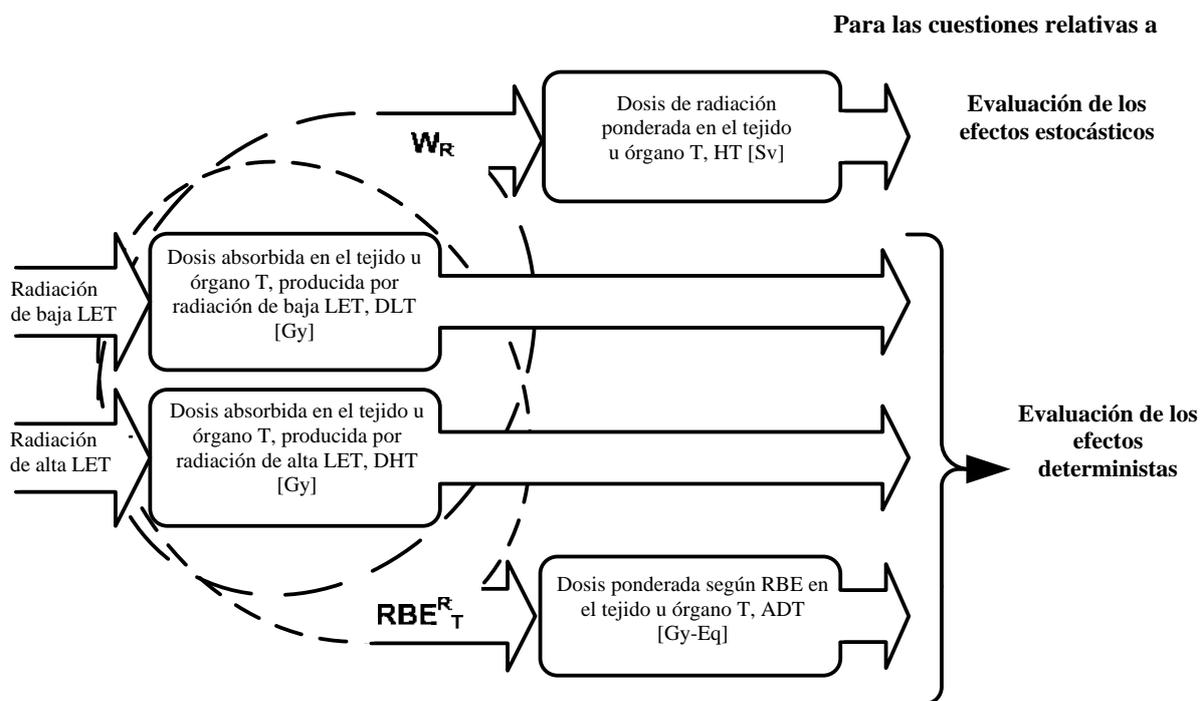


FIG. 1. Magnitudes dosimétricas empleadas para evaluar los efectos de la radiación en la salud (la transferencia lineal de energía se denota por su sigla en inglés LET).

La dosis ponderada según RBE comprometida,  $AD_T(\Delta)$ , se utilizó para evaluar el riesgo de desarrollar efectos deterministas graves en la salud tras la incorporación de un radionucleido. La dosis ponderada según RBE comprometida  $AD_T(\Delta)$  en el órgano o tejido T se define como la integral en el tiempo de la tasa de dosis ponderada según RBE en el órgano o tejido en el tiempo  $\Delta$  a raíz de una incorporación de material radiactivo y viene dada por:

$$AD_T(\Delta) = \int_{t_0}^{t_0+\Delta} \dot{AD}_T(t) dt = \sum_S I_S \times AF_{T,S}(\Delta), \quad (4)$$

donde:

$t_0$  es el tiempo de la incorporación;

$\Delta$  es el periodo de integración, también denominado periodo de compromiso;

$\dot{AD}_T(t)$  es la tasa de dosis ponderada según RBE en el órgano o tejido T en el tiempo t siguiente a la incorporación de un determinado radionucleido, ((Gy-Eq)/s);

$I_S$  es la actividad de la incorporación del radionucleido a través de una vía determinada por el escenario S, (Bq); y

$AF_{T,S}(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según RBE en el órgano o tejido T, comprometida durante el tiempo  $\Delta$  según el escenario S, para una incorporación de 1 Bq de un radionucleido, ((Gy-Eq)/Bq).

La dosis ponderada según RBE y la dosis ponderada según RBE comprometida se expresan en gray-equivalentes (unidad denotada en inglés por gray-equivalent (Gy-Eq)) [15, 21, 22].

La dosis de radiación ponderada y la dosis de radiación ponderada comprometida se emplean en el ámbito de la protección radiológica y no se usan en este informe. La dosis de radiación ponderada,  $H_T$ ,

se define como la suma para todos los tipos de radiación del producto de la dosis absorbida (externa y comprometida) en el órgano o tejido, y el factor de ponderación de la radiación  $w_R$  [10, 20, 23]. Viene dada por:

$$H_T = \sum_R D_T^R \times w_R \quad \text{y} \quad H_T(\tau) = \sum_R D_T^R(\tau) \times w_R \quad (5)$$

donde:

$H_T$  es la dosis de radiación ponderada al órgano o tejido T, causada por radiación externa;

$H_T(\tau)$  es la dosis de radiación ponderada comprometida en el tejido T a lo largo del tiempo de integración  $\tau$  y  $w_R$  es el factor de ponderación de la radiación para la radiación R. Si no se especifica  $\tau$ , se tomará como valor 50 años en el caso de adultos y 70 para incorporaciones en niños [11, 20].

La unidad de dosis de radiación ponderada y de dosis de radiación ponderada comprometida es el sievert (Sv) [20, 23].

## I.2. EL ENFOQUE EXPERTO

En el enfoque experto para el cálculo de los valores se D utilizaron niveles de referencia de la dosis absorbida en tejidos u órganos críticos con el fin de evaluar la aparición de efectos deterministas graves:

- Para evaluar la exposición externa, los niveles de referencia se expresan en forma de dosis absorbida en el órgano,  $D_T^R$ , y se presentan en el Cuadro 5;
- Para evaluar la exposición interna, los niveles de referencia se expresan en forma de dosis absorbida comprometida en el órgano,  $D_T^R(\Delta)$ , y se presentan en el Cuadro 6;

El nivel de referencia de la dosis es aquel que, si no se rebasa, evita el desarrollo del efecto en las personas expuestas.

CUADRO 5. NIVELES DE REFERENCIA UTILIZADOS EN EL ENFOQUE EXPERTO PARA LA APARICIÓN DE EFECTOS DETERMINISTAS GRAVES POR EXPOSICIÓN EXTERNA

| Vía de exposición  | Efecto                     | Tejido u órgano crítico               | Nivel de referencia |                      |
|--|----------------------------|---------------------------------------|---------------------|----------------------|
|  |                            |                                       | Valor (Gy)          | Símbolo <sup>a</sup> |
| Exposición de tejido blando a una fuente adyacente                 | Necrosis del tejido blando | Tejido blando <sup>b</sup> (Tejido 1) | 25                  | $RD_1^{L+H}$         |
| Exposición por contacto con contaminación superficial              | Descamación húmeda         | Membrana basal de la piel (Tejido 6E) | 25 <sup>d</sup>     | $RD_{6E}^{L+H}$      |
| Exposición de todo el cuerpo a una fuente distante o a inmersiones | Véase la nota c            | Torso (Tejido 7)                      | 1 <sup>c</sup>      | $RD_7^{L+H}$         |

<sup>a</sup> Puede verse una descripción de los símbolos y los índices en los Anexos I y II.

<sup>b</sup> 50-100 cm<sup>2</sup> y hasta una profundidad de unos 0,5 cm bajo la superficie corporal.

<sup>c</sup> El valor es la dosis de referencia mínima para desarrollar cualquier efecto determinista grave debido a una irradiación uniforme de todo el cuerpo. El nivel de referencia de 1 Gy se escogió por ser el límite inferior de los niveles de referencia para la aparición de efectos deterministas graves en la médula ósea roja, la tiroides, el cristalino y los órganos reproductores, como se muestra en el Cuadro 7.

<sup>d</sup> Hasta 100 cm<sup>2</sup> de piel aproximadamente. La dosis se refiere a estructuras cutáneas a una profundidad de 7 mg/cm<sup>2</sup> (o 0,07 mm) bajo la superficie, que se supuso es el tejido crítico para el desarrollo de un efecto determinista grave. Este supuesto es conservador, como se analiza en el Apéndice V.

CUADRO 6. NIVELES DE REFERENCIA UTILIZADOS EN EL ENFOQUE EXPERTO PARA LA APARICIÓN DE EFECTOS DETERMINISTAS GRAVES POR EXPOSICIÓN INTERNA

| Vía de exposición      | Efecto                  | Órgano o tejido                                     | Características del material radiactivo  | Nivel de referencia |              |   |
|------------------------|-------------------------|---|--|---------------------|--------------|---|
|                        |                         |   |  | Valor (Gy)          | $\Delta$ (d) | Símbolo <sup>a</sup>                        |
| Inhalación o ingestión | Síndrome hematopoyético | Médula roja (Tejido 2)                              | Cualquier radionucleido  | 1                   | 2            | RD <sub>2</sub> <sup>L+H</sup> ( $\Delta$ ) |
| Inhalación             | Neumonitis              | Región torácica del tracto respiratorio (Tejido 3E) | Tipo S <sup>b</sup> emisor de radiación de alta TLE de periodo largo   | 25                  | 365          | RD <sub>3E</sub> <sup>HS</sup> ( $\Delta$ ) |
|                        |                         |   | Tipo S <sup>b</sup> emisor de <sup>90</sup> Sr de periodo largo (p. ej. <sup>90</sup> Sr TiO <sub>3</sub> <sup>c</sup> ) | 40                  | 365          | RD <sub>3E</sub> <sup>LS</sup> ( $\Delta$ ) |
|                        |                         |   | Otros emisores de radiación de baja TLE  | 6                   | 2            | RD <sub>3E</sub> <sup>L</sup> ( $\Delta$ )  |
| Inhalación o ingestión | Hipotiroidismo          | Tiroides (Tejido 5)                                 | Radionucleidos tiroidótrofos <sup>d</sup>  | 5                   | 365          | RD <sub>5</sub> <sup>L</sup> ( $\Delta$ )   |

<sup>a</sup> Puede verse una descripción de los símbolos y los índices en los Anexos I y II.

<sup>b</sup> El tipo S indica una absorción lenta por el pulmón [11].

<sup>c</sup> Caso especial del compuesto insoluble de <sup>90</sup>Sr.

<sup>d</sup> Los radionucleidos tiroidótrofos (se designan así los que se depositan preferentemente en la tiroides) son emisores de radiación de baja TLE.

Cuando se consideró apropiado, los niveles de referencia utilizados en el enfoque experto se basaron en los niveles de actuación prescritos en normas internacionales de seguridad, concretamente en el Cuadro IV-I de la Ref. [11] reproducido aquí en el Cuadro 7. Se trata de las dosis absorbidas proyectadas al órgano o tejido en menos de 2 días, para las que se prevé la adopción de medidas urgentes de protección en cualquier circunstancia con el fin de prevenir efectos deterministas en la salud. Se supuso que los niveles eran dosis cercanas a aquellas a las que serían de prever efectos deterministas [10] a raíz de una exposición breve. Tal exposición solo cabría esperarla de fuentes externas. Los niveles de referencia de la dosis utilizados en el enfoque experto difieren de los niveles de actuación mostrados en la Ref. [11], como se analiza más abajo, para tener en cuenta sobre todo:

- los efectos deterministas graves en la salud en la piel y el tejido blando; y
- los efectos deterministas graves en la salud debidos a exposiciones de mayor duración.

CUADRO 7. NIVELES DE ACTUACIÓN DE LA DOSIS ABSORBIDA PROYECTADA AL ÓRGANO O TEJIDO EN MENOS DE 2 DÍAS

| Tejido u órgano blanco       | Nivel de actuación |
|------------------------------|--------------------|
|                              | (Gy)               |
| Todo el cuerpo (médula roja) | 1                  |
| Pulmón                       | 6                  |
| Piel                         | 3                  |
| Tiroides                     | 5                  |
| Cristalino                   | 2                  |
| Gónadas                      | 3                  |

En caso de exposición de todo el cuerpo debida a una fuente externa, el nivel de referencia para el torso indicado en el Cuadro 5 es la dosis mínima para el desarrollo de cualquier efecto determinista grave por irradiación uniforme de todo el cuerpo. El nivel de referencia de 1 Gy a la médula roja en 100 horas debido a una fuente distante se utilizó como tal porque es el confín inferior de los niveles de referencia para la aparición de efectos deterministas graves en la médula ósea roja, la tiroides, el cristalino y los órganos reproductores, como muestra el Cuadro I-3 de la Ref. [15]. Como duración de la exposición se adoptó el periodo, más prolongado, de 100 horas en lugar de 2 días porque así se producen las tasas de dosis más bajas que se consideran un peligro para la vida [15]. Trabajos posteriores [15, 21] mostraron que una dosis de 1 Gy debida a exposición externa es un valor igual o inferior al nivel umbral de dosis para el que cabría esperar efectos deterministas graves en otros tejidos u órganos (p. ej. el cristalino, las gónadas) a consecuencia de la exposición de todo el cuerpo causada por una fuente distante.

Como se indica en el Apéndice II, el experto no consideró explícitamente la ingestión dado que, en el caso de incorporación, el escenario inhalación debería ser el decisivo. Más aún, se admitió que [12] las dosis umbral para la aparición de efectos deterministas graves en la médula ósea y en el pulmón a raíz de una inhalación serían considerablemente superiores a las de la breve exposición externa mostradas en el Cuadro 7. No obstante, sobre la base de un análisis de los estudios [12] disponibles en aquella fecha (cuando se realizaban los cálculos para el enfoque experto), en el caso de emisores de baja TLE, se halló que la incorporación asociada a los niveles de actuación indicados para el pulmón en el Cuadro 7 (6 Gy en 2 días) originaba una tasa de dosis que constituía un caso límite razonable para estimar la incorporación que, se consideraba, ponía en peligro la vida. En el caso del estroncio-90, se tomó el compuesto insoluble  $^{90}\text{SrTiO}_3$  (absorción por el pulmón de tipo s). En este caso particular se supuso un nivel de referencia de 40 Gy comprometido en 365 días para la región torácica pulmonar. Esta hipótesis más conservadora se apoyó en los datos de la Ref. [24], que se basaba en estudios con animales. Tales características se indican en el símbolo del nivel de referencia ( $\text{RD}_{3\text{E}}^{\text{LS}}(\Delta)$ ) mediante el superíndice LS para la radiación de baja TLE procedente de un compuesto con absorción por el pulmón de tipo s.

En cuanto a la exposición pulmonar a raíz de la inhalación de radionucleidos emisores de alta TLE, el nivel de actuación correspondiente al pulmón indicado en el Cuadro 7 (6 Gy en 2 días) no se consideró un nivel de referencia apropiado para la aparición de efectos deterministas graves. En este caso se utilizó una dosis absorbida de 25 Gy en la región torácica, comprometida a lo largo de 365 días, como nivel de referencia para la aparición de efectos deterministas graves en el pulmón. Esto se basó en la Ref. [24], la cual indica, fundándose en estudios con animales, que una dosis de 25 Gy al pulmón en 365 días es un indicio de un 5% de riesgo aproximadamente de desarrollar una neumonitis por radiación como consecuencia de la inhalación del emisor alfa de periodo largo  $^{239}\text{Pu}$ . Estas características se denotan en el símbolo del nivel de referencia ( $\text{RD}_{3\text{E}}^{\text{HS}}(\Delta)$ ) mediante el

<sup>5</sup> Compuesto utilizado normalmente en generadores termoelectrónicos radioisotópicos (GTR).

superíndice HS para la radiación de alta TLE procedente de un compuesto con una absorción por el pulmón de tipo s.

El nivel de actuación relativo a la piel del Cuadro 7 (3 Gy en 2 días) no se consideró apropiado porque se refería al eritema [10], que no es un efecto determinista grave en la salud. La experiencia muestra [25, 26, 27] que es precisa la necrosis de la capa superficial del tejido blando en una zona de 50 a 100 cm<sup>2</sup> aproximadamente y una profundidad de unos 0,5 cm para que una exposición externa local produzca un efecto determinista grave. Una dosis absorbida de 25 Gy es el nivel de referencia para evaluar este efecto [15, 25].

En el caso de exposición interna de la tiroides debida a la incorporación de radionucleidos tiroidótrofos, el hipotiroidismo se consideró un efecto determinista grave que merma la calidad de vida. En el Cuadro IV-I de la Ref. [11] se indica una dosis absorbida en la tiroides de 5 Gy, recibida en 2 días, como nivel de actuación al cual siempre se justifica una intervención para evitar el hipotiroidismo. Pero los únicos factores de conversión de dosis fácilmente disponibles para una exposición de la tiroides a raíz de una incorporación correspondían a una dosis absorbida comprometida en la tiroides durante toda la vida [28]. Por lo tanto, se utilizaron estos factores de dosis. Teniendo en cuenta el periodo de semidesintegración biológica y física de los radionucleidos que producen una dosis significativa en la tiroides (isótopos del I y el Te), estos factores de dosis correspondían, de hecho, a un periodo de compromiso mucho menor que el de 365 días; no obstante, se asigna un periodo de compromiso ( $\Delta$ ) de 365 días a este nivel de referencia  $RD_5^L(\Delta)$  para indicar un periodo de compromiso claramente superior a varios periodos de semidesintegración efectivos.

### **I.3. EL ENFOQUE RIESGO PARA EVALUAR LA APARICIÓN DE EFECTOS DETERMINISTAS**

En el enfoque riesgo para el cálculo de los valores D se utilizaron los niveles umbral de dosis ponderada según la eficacia biológica relativa (EBR) en el órgano o tejido crítico con el fin de evaluar la aparición de efectos deterministas graves:

- a) Para la evaluación de la exposición externa, los niveles umbral se expresan en forma de dosis ponderada según EBR,  $AD_{T,05}$ . Se indican en el Cuadro 8; y
- b) Para la evaluación de la exposición interna, los niveles umbral se expresan en forma de dosis ponderada según EBR comprometida,  $AD_{T,05}(\Delta)$ . Figuran en el Cuadro 9.

Un nivel umbral de dosis es el que, en teoría, produce el efecto en el 5% de las personas expuestas.

En 1980 Scott propuso inicialmente el modelo biofísico utilizado en el enfoque riesgo para evaluar los efectos deterministas graves [29, 30]. El modelo riesgo, que correlaciona los efectos deterministas graves con los parámetros asociados se desarrolló empleando datos provenientes de experimentos con animales y un análisis de exposiciones de seres humanos. La formulación matemática del modelo es similar a la función de probabilidad utilizada en la teoría de la fiabilidad y se expone en NUREG/CR-4214 [12, 13, 14]. La utilización de este modelo para el enfoque riesgo se describe detalladamente en la Ref. [15].

CUADRO 8. NIVELES UMBRAL DE DOSIS PONDERADA SEGÚN EBR DEBIDA A EXPOSICIÓN EXTERNA

| Exposición  | Efecto                     | Órgano o tejido                          | Nivel umbral     |                      |
|---|----------------------------|--|------------------|----------------------|
|   |                            |  | Valor<br>(Gy-Eq) | Símbolo <sup>a</sup> |
| Exposición local debida a una fuente adyacente                        | Necrosis del tejido blando | Tejido blando <sup>b</sup><br>(Tejido 1) | 25               | TD <sub>1</sub>      |
| Exposición por contacto debida a contaminación superficial            | Descamación húmeda         | Dermis<br>(Tejido 6R)                    | 10 <sup>d</sup>  | TD <sub>6R</sub>     |
| Exposición de todo el cuerpo debida a una fuente distante o inmersión | Nota c                     | Torso<br>(Tejido 7)                      | 1 <sup>c</sup>   | TD <sub>7</sub>      |

<sup>a</sup> Puede verse una descripción de los símbolos y los índices en los Anexos I y II.

<sup>b</sup> Tejido blando en una zona de 100 cm<sup>2</sup> y hasta una profundidad de 0,5 cm aproximadamente bajo la superficie corporal.

<sup>c</sup> El valor es la dosis umbral mínima para desarrollar cualquier efecto determinista grave debido a una irradiación uniforme de todo el cuerpo. El nivel umbral de 1 Gy se escogió por ser el confín inferior de los niveles umbral para la aparición de efectos deterministas graves en la médula ósea roja, la tiroides, el cristalino y los órganos reproductores, como muestra el Cuadro I-3 de la Ref. [15].

<sup>d</sup> Se supone que es necesaria la exposición a este nivel de, al menos, 100 cm<sup>2</sup> de piel para producir efectos deterministas graves en la salud [12]. La dosis se refiere a estructuras cutáneas a una profundidad de 40 mg/cm<sup>2</sup> (o 0,4 mm) bajo la superficie.

CUADRO 9. NIVELES UMBRAL DE DOSIS PONDERADA SEGÚN EBR COMPROMETIDA DEBIDA A EXPOSICIÓN INTERNA

| Vía de exposición      | Efecto                    | Tejido u órgano blanco  | Nivel umbral                       |                  | Símbolo <sup>a</sup>          |
|------------------------|---------------------------|---|------------------------------------|------------------|-------------------------------|
|                        |                           |   | Valor<br>(Gy-Eq)                   | $\Delta$<br>(d)  |                               |
| Inhalación e ingestión | Síndrome hematopoyético   | Médula roja <sup>b, c</sup><br>(Tejido 2)                           | 0.2 <sup>d</sup><br>2 <sup>e</sup> | 30               | TD <sub>2</sub> ( $\Delta$ )  |
| Inhalación             | Neumonitis                | Región alveolar-intersticial del tracto respiratorio<br>(Tejido 3R) | 30                                 | 30               | TD <sub>3R</sub> ( $\Delta$ ) |
| Inhalación e ingestión | Síndrome gastrointestinal | Colon<br>(Tejido 4)   | 20                                 | 30               | TD <sub>4</sub> ( $\Delta$ )  |
| Inhalación e ingestión | Hipotiroidismo            | Tiroides<br>(Tejido 5)  | 2 <sup>f</sup>                     | 365 <sup>g</sup> | TD <sub>5</sub> ( $\Delta$ )  |

<sup>a</sup> Puede verse una descripción de los símbolos y los índices en los Anexos I y II.

<sup>b</sup> Para los casos con asistencia médica de apoyo.

<sup>c</sup> Los radionucleidos de  $Z \geq 90$  comparados con los de  $Z \leq 89$  presentan procesos biocinéticos diferentes y, por tanto, distintas dinámicas de formación de dosis en la médula roja por exposición interna. Por consiguiente, los radionucleidos se han dividido en dos grupos para evitar un conservadurismo excesivo al evaluar el riesgo del efecto en la salud de que se trate.

<sup>d</sup> Para los radionucleidos de  $Z \geq 90$ .

<sup>e</sup> Para los radionucleidos de  $Z \leq 89$ .

<sup>f</sup> Se utilizó el valor del Apéndice A de la Ref. [12].

<sup>8</sup> Teniendo en cuenta el periodo de semidesintegración biológico y físico de los radionucleidos que producen una dosis significativa en la tiroides (isótopos del I y el Te), estos factores de dosis correspondían, de hecho, a un periodo de compromiso mucho menor de 365 días; no obstante, se asigna un periodo de compromiso ( $\Delta$ ) de 365 días a este nivel de referencia.

Según el modelo de riesgo, la posibilidad de desarrollar efectos deterministas en la salud en un órgano o tejido T,  $R_{S,T}$ , depende de la función de riesgo que caracteriza un efecto dado. La función de riesgo,  $H_T\{T_S, \dot{AD}_T(t)\}$ , depende del historial de exposición durante el periodo de exposición,  $(0, T_S)$ , definido por el escenario de exposición S. La expresión general de la función de riesgo dada en la Ref. [14] es:

$$H_T\{T_S, \dot{AD}_T(t)\} = [\ln(2)] \left[ \int_0^{T_S} \frac{\dot{AD}_T(t)}{\theta_T^\infty + \theta_T^1 / \dot{AD}_T(t)} dt \right]^{V_T}, \quad (6)$$

donde:

$\dot{AD}_T(t)$  es la tasa de dosis ponderada según EBR instantánea en el órgano o tejido T en un tiempo t siguiente al inicio de la exposición, ((Gy-Eq)/h);

$\theta_T^\infty$  es un parámetro que caracteriza la radiosensibilidad de un tejido u órgano dado, y es igual al valor asintótico de la dosis ponderada según EBR que, teóricamente, es causa de que la dolencia considerada afecte al 50% de las personas expuestas a una tasa de dosis muy alta (exposición breve), (Gy-Eq);

$\theta_T^1$  es un parámetro que caracteriza la eficacia de la reparación de una lesión debida a la radiación ((Gy-Eq)<sup>2</sup>/h); y

$V_T$  es un parámetro que determina la forma (la pendiente) de la curva dosis-respuesta correspondiente a los efectos deterministas en la salud en el órgano T. La forma de la curva dosis-respuesta refleja una variabilidad de la radiosensibilidad humana y la capacidad de compensar una lesión inducida por la radiación en el órgano o tejido.

Los parámetros del modelo de riesgo [15] utilizados en el enfoque riesgo se enumeran en el Cuadro 10.

CUADRO 10. PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL MODELO DE RIESGO DE DESARROLLO DE CIERTOS EFECTOS DETERMINISTAS GRAVES EN LA SALUD

| Efecto en la salud                   | Órgano crítico             | Exposición <sup>a</sup>                                 | Parámetro <sup>b</sup>     |                           | V <sub>T</sub> |  |    |    |    |
|--------------------------------------|----------------------------|---|----------------------------|---------------------------|----------------|--|----|----|----|
|                                      |                            |   | RBE (efic. biol. relativa) | $\theta_T^\infty$ (Gy-Eq) |                | $\theta_T^1$ ((Gy-Eq) <sup>2</sup> /h) |    |    |    |
| Síndrome hematopoyético <sup>c</sup> | Médula roja                | Externa $\gamma$  | 1                          | 4.5                       | 0.1            | 6                                      |    |    |    |
|                                      |                            | Externa $n^0$   | 3                          |                           |                |  |    |    |    |
|                                      |                            | Interna $\beta, \gamma$                                 | 1                          |                           |                |  |    |    |    |
|                                      |                            | Interna $\alpha$  | 2                          |                           |                |  |    |    |    |
| Neumonitis                           | Pulmón <sup>d</sup>        | Interna $\beta, \gamma$                                 | 1                          | 10 <sup>d</sup>           | 30             | 12                                     |    |    |    |
|                                      |                            | Interna $\alpha$  | 7                          |                           |                |  |    |    |    |
| Síndrome GI                          | Colon                      | Interna $\beta, \gamma$                                 | 1                          | 15                        | 4              | 10                                     |    |    |    |
|                                      |                            | Interna $\alpha$  | 0 <sup>e</sup>             |                           |                |  | NE | NE | NE |
|                                      |                            | Externa $n^0$   | 3                          |                           |                |  |    |    |    |
| Descamación húmeda                   | Piel <sup>f</sup>          | Externa $\beta, \gamma$                                 | 1                          | 20                        | NE             | 5                                      |    |    |    |
| Tiroiditis aguda por radiación       | Tiroides                   | Incorporación de algunos isótopos del yodo <sup>g</sup> | 0.2                        | 240                       | NE             | 1.9                                    |    |    |    |
|                                      |                            | Otros tiroidótrofos                                     | 1                          |                           |                |  |    |    |    |
| Necrosis                             | Tejido blando <sup>h</sup> | Externa $\beta, \gamma$                                 | 1                          | 25                        | NE             | $\infty^i$                             |    |    |    |

<sup>a</sup> La exposición externa  $\beta, \gamma$  incluye la dosis por la radiación de frenado producida en el interior de los materiales de la fuente.

<sup>b</sup> Estimación central del valor. “NE” significa “no estimado”.

<sup>c</sup> Para los casos con tratamiento médico de apoyo. Con un tratamiento mínimo,  $\theta_T^\infty$  es 3 Gy-Eq y  $\theta_T^1$  es 0,07 (Gy-Eq)<sup>2</sup>/h [12].

<sup>d</sup> Los valores mostrados de  $\theta_T^\infty$  son los correspondientes a irradiación pulmonar en niños o adultos de edad igual o inferior a 40 años. Para individuos de edad superior esos valores deberían dividirse por dos [12], [14, Cuadro 2.4].

<sup>e</sup> Para los emisores alfa distribuidos uniformemente en el contenido del colon, se supone que la irradiación en las paredes del intestino es despreciable.

<sup>f</sup> Para una zona de la piel de 100 cm<sup>2</sup>, lo cual se considera que pone en peligro la vida [12]. La dosis en la piel debería calcularse para una profundidad de 0,4 mm, como se recomienda en [19], en los párrs. (305), (306) y (310) de [17] y en la sección 3.4.1 de [18].

<sup>g</sup> Se supone que la irradiación uniforme del tejido crítico de la glándula tiroidea produce efectos deterministas en la salud con una probabilidad cinco veces superior a la de la exposición interna a isótopos del yodo emisores beta de baja energía, tales como el <sup>131</sup>I, <sup>129</sup>I, <sup>125</sup>I, <sup>124</sup>I y el <sup>123</sup>I [12]. Los radionucleidos tiroidótrofos tienen una distribución heterogénea en el tejido tiroideo. El yodo-131 emite partículas beta de baja energía que dan lugar a una eficacia reducida de la irradiación de los tejidos tiroideos críticos debido a la disipación de su energía en otros tejidos. El valor indicado para  $\theta_T^\infty$  corresponde a una dosis absorbida comprometida en la tiroides de 1200 Gy por exposición interna a raíz de la incorporación de <sup>131</sup>I.

<sup>h</sup> En el tejido a una profundidad de 0,5 cm bajo la superficie corporal en un área de más de 100 cm<sup>2</sup> se producen efectos deterministas graves [15, 25].

<sup>i</sup> Indica que la función de riesgo tiene una pendiente muy alta.

En el modelo de riesgo no se tuvo en cuenta el desarrollo de un efecto determinista a lo largo del tiempo, por ejemplo, la probabilidad de fallecimiento unos días o semanas después de la irradiación, pero se definió el valor de  $R_{S,T}$  (expresado en %) como:

$$\frac{R_{S,T}}{100} = 1 - \exp\left[-H_T\{T_S, \dot{AD}_T(t)\}\right]. \quad (7)$$

En los escenarios que conllevan una exposición externa (Apéndice II, Escenarios I, II, V y VI) utilizados para calcular los valores D se consideró que la exposición se realizaba con una tasa de dosis fija. La función de riesgo en el caso especial de exposición a una tasa de dosis fija se presenta en la Ref. [15]:

$$H_T(AD_T) = [\ln(2)] \left[ \frac{\dot{AD}_T \times T_S}{AD_{T,50}} \right]^{V_T}, \quad (8)$$

donde:

$AD_{T,50}$  es el valor de la dosis ponderada según EBR que, teóricamente, es causa de que la dolencia considerada afecte al 50% de las personas expuestas;

$$AD_{T,50} = \theta_T^\infty + \theta_T^1 \left( \dot{AD}_T \right)^{-1}; \quad (9)$$

$\dot{AD}_T$  es la tasa de dosis ponderada según EBR constante en el órgano o tejido T, ((Gy-Eq)/h);

$T_S$  es la duración de la irradiación, (h), definida para el escenario de que se trate e indicada en el Cuadro 11; y

$\theta_T^\infty$ ,  $\theta_T^1$  y  $\dot{AD}_T$  son los parámetros de la función de riesgo presentados en el Cuadro 10.

En el enfoque riesgo se utilizó un valor de la dosis ponderada según EBR que, teóricamente, afecta al 5% de las personas expuestas,  $AD_{T,05}$ , como dosis umbral de exposición externa con una tasa de dosis fija  $TD_T$ . Este valor es la solución de la ecuación (7) cuando  $R=5\%$ .

$$TD_T = \left[ \theta_T^\infty + \theta_T^1 \left( \dot{AD}_T \right)^{-1} \right] \times \exp\left(-\frac{2.6}{V_T}\right). \quad (10)$$

En el modelo de riesgo no se consideró la recuperación ni la variabilidad en el desarrollo de la lesión en un tejido blando. Por consiguiente, el valor umbral de la dosis ponderada según EBR a este efecto,  $TD_1$ , es igual al valor correspondiente de  $\theta_1^\infty$  y no depende del historial de exposición. En el modelo de riesgo sí se consideró la recuperación y la variabilidad en el desarrollo de una lesión en el torso y en la médula roja. Asimismo se tuvo en cuenta solamente la variabilidad en el desarrollo de una lesión en la piel. Por tanto, los valores umbral de la dosis ponderada según EBR referentes a estos efectos son menores que los valores correspondientes de  $\theta_1^\infty$  determinados por la ecuación (10). Los valores de la dosis umbral para el examen de los efectos deterministas se presentan en el Cuadro 8.

En el caso de la exposición interna debida a la incorporación de un radionucleido, la tasa de dosis ponderada según EBR ( $\dot{AD}_T$ ) en cualquier órgano o tejido es una función del tiempo definida por la biocinética del radionucleido en el cuerpo humano expresada por:

$$\dot{AD}_T(t) = I \times \dot{Ad}_T(t), \quad (11)$$

donde:

$I$  es la incorporación del radionucleido de que se trate; y

$\dot{Ad}_T(t)$  es la tasa de dosis ponderada según EBR en el órgano T, en el tiempo t consecutivo a la incorporación de 1 Bq de dicho radionucleido.

La función de riesgo en el caso especial de que el historial de exposición venga dado por la ecuación (11), figura en la Ref. [15]:

$$H_T(I) \cong [\ln(2)] \times (I)^{2 \times V_T} \times \left[ \int_0^{\infty} \frac{\dot{Ad}_T(t)}{I \times \theta_T^{\infty} + \left( \dot{Ad}_T(t) \right)^{-1} \theta_T^1} dt \right]^{V_T}, \quad (12)$$

donde:

$I$  es la incorporación del radionucleido de que se trate;

$\dot{Ad}_T(t)$  es la tasa de dosis ponderada según EBR en el órgano T en el tiempo t posterior a la incorporación de 1 Bq de dicho radionucleido; y

$\theta_T^{\infty}$ ,  $\theta_T^1$  y  $V_T$  son los parámetros de la función de riesgo presentados en el Cuadro 10.

El riesgo de que se desarrollen efectos deterministas graves a raíz de la incorporación de un radionucleido se caracteriza por un nivel umbral de incorporación,  $I_{T,05}$ , igual a la incorporación de material radiactivo que, teóricamente, dé lugar al desarrollo de efectos deterministas graves en el órgano T en un 5% de las personas expuestas. El valor de  $I_{T,05}$  relativo a cualquier radionucleido y vía de incorporación puede obtenerse mediante la solución numérica de la ecuación (7) para  $R=5\%$  y la función de riesgo dada por la ecuación (12). Para una determinada vía de incorporación y un efecto dado, el valor de  $I_{T,05}$  depende de las propiedades químicas y físicas del radionucleido, como se señala en la Ref. [15]. Un cálculo modelo muestra que estos valores abarcan varios órdenes de magnitud debido al periodo de semidesintegración del radionucleido. Los efectos de la forma química de un aerosol (tipo de absorción) y su tamaño (diámetro aerodinámico de la mediana de la actividad, DAMA) son mucho menores, pero sí existen. En general, los valores de  $I_{T,05}$  abarcan ocho órdenes de magnitud en el caso de los radionucleidos enumerados en el Cuadro 1. Por consiguiente, esa magnitud no se podía utilizar como base de un valor umbral general apropiado para evaluar la exposición interna debida a la incorporación de cualquier radionucleido. Una solución práctica de esta dificultad consistió en utilizar la dosis ponderada según EBR comprometida, definida por la ecuación (4), en lugar de la incorporación, como base para los criterios de respuesta a emergencias. Se trata de una función matemática que convierte la incorporación de material radiactivo (actividad que se introduce en el

organismo humano) en la magnitud dosimétrica. La incorporación umbral es función inversa del periodo de semidesintegración de un radionucleido, por lo cual cuanto menor es el periodo de semidesintegración, mayor es el umbral de incorporación. Un factor de conversión de dosis comprometida presenta una dependencia opuesta: cuanto menor es el periodo de semidesintegración, menor es el factor de conversión. Así pues, si un valor de  $\Delta$  es el óptimo, la conversión de una incorporación umbral en el valor umbral de la dosis ponderada según EBR comprometida puede dar lugar a una disminución significativa del rango de valores umbral. En la Ref. [15] se demostró que el valor de 30 días para el periodo de compromiso  $\Delta$  es el óptimo. Por ejemplo, en el caso de la neumonitis por radiación, la conversión de los valores de la incorporación umbral en niveles umbral de dosis ponderadas según EBR comprometida para 30 días da lugar a una reducción del rango de valores umbral de 8 órdenes de magnitud a un factor de solamente 3.

Los niveles umbral de la dosis ponderada según EBR comprometida para la exposición interna utilizados en el enfoque riesgo para calcular los valores  $D_2$  se presentan en el Cuadro 9. El valor umbral de la dosis ponderada según EBR comprometida para un periodo  $\Delta$  siguiente a la incorporación, que corresponde a la incorporación umbral es:

$$TD_T(\Delta) = \int_0^{\Delta} \dot{A} D_{T,05}(t) dt = I_{T,05} \times \int_0^{\Delta} \dot{A} d_T(t) dt = I_{T,05} \times AF_{T,S}(\Delta), \quad (13)$$

donde:

$I_{T,05}$  es el valor umbral de incorporación para el desarrollo de un efecto determinista grave en la salud en el órgano T, (Bq);

$\dot{A} d_T(t)$  es la tasa de dosis ponderada según EBR en el órgano T en el tiempo t siguiente a la incorporación de 1 Bq del radionucleido de que se trate; y

$AF_{T,S}(\Delta)$  es un factor de conversión de dosis ponderada según EBR comprometida de una exposición interna del órgano T debida a una incorporación de un radionucleido por una vía definida en el escenario S, ((Gy-Eq)/Bq).



## APÉNDICE II ESCENARIOS PARA DETERMINAR LOS VALORES D

### II.1. EXPOSICIÓN A MATERIAL NO DISPERSADO

En este informe se entiende por material radiactivo no dispersado una fuente radiactiva sin blindaje y encapsulada. Puesto que el material radiactivo está sellado, únicamente se tiene en cuenta la exposición externa causada por el material radiactivo no dispersado.

Para determinar la cantidad peligrosa de una fuente se consideraron dos escenarios en que existe exposición local a una fuente adyacente:

- a) El escenario “mano”, el cual trata de una fuente portada en una mano; y
- b) El escenario “bolsillo”, el cual trata de una fuente transportada en un bolsillo.

Los antecedentes al respecto indican que el tiempo durante el cual probablemente se transporte una fuente en el cuerpo (p. ej. en un bolsillo) se limita a unas 10 horas y, en la mano, se limita a aproximadamente 1 hora. Por lo tanto, el análisis muestra que el escenario "bolsillo" es más limitativo que el escenario "mano" y por ello se utilizó en el cálculo de los valores  $D_1$  para fuentes lo suficientemente pequeñas como para ser llevadas en una mano o metidas en un bolsillo.

#### II.1.1. Escenario I: escenario “bolsillo”

El Escenario I es denominado escenario “bolsillo”. Se utilizó para determinar la cantidad de material radiactivo sin blindaje que, si estuviese junto al cuerpo humano, cabría considerar como una fuente de exposición local externa peligrosa. La exposición externa debida a una fuente sin blindaje transportada en la mano o en un bolsillo es la causa más común de lesiones graves radioinducidas y muertes relacionadas con fuentes incontroladas, bien sean robadas o perdidas (véase el Apéndice VII).

La experiencia [27] también muestra que la necrosis de un tejido blando inducida por radiación en una zona de unos 50-100 cm<sup>2</sup> y a una profundidad de unos 0,5 cm en muchas partes del cuerpo (p. ej. en el muslo o el pecho) debida al transporte de una fuente en un bolsillo [26, 31] puede causar una merma sustancial de la calidad de vida. Más aún, la experiencia demuestra [32] que una fuente transportada en un bolsillo se desplaza con el tiempo tanto lateral como longitudinalmente.

Los factores de conversión de dosis para la dosis causada por una fuente adyacente (escenario bolsillo) se calcularon de modo que simulasen la dosis de una fuente que se mueve y produce una necrosis de la capa superficial del tejido blando en un zona de unos 50-100 cm<sup>2</sup>. De esto trata el Apéndice IV.

Además, se supuso que no es razonable transportar una masa de 500 g. Por lo tanto, se fijó este valor como el límite de masa para el escenario “bolsillo”. Los parámetros relativos al Escenario I se enumeran en el Cuadro 11.

En el enfoque experto, la dosis media absorbida en el tejido blando según el escenario bolsillo viene dada por:

$$D_{1,I}^{L+H}(A) = DF_{1,I}^{L+H} \times T_1 \times A, \quad (14)$$

donde:

$D_{1,I}^{L+H}(A)$  es la dosis absorbida (Gy) en el tejido blando según el escenario bolsillo, causada por una fuente adyacente de actividad A;

$DF_{1,I}^{L+H}$  es el factor de conversión de tasa de dosis absorbida aplicable a la dosis absorbida en el tejido blando según el escenario bolsillo, (Gy/(Bqxs)). Para una TLE alta se indica en el Cuadro 13 y para una TLE baja es numéricamente igual al factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR,  $AF_{1,I}$ , mostrado en el Cuadro 15.

$T_1$  es la duración de la exposición para el Escenario I, (s), y se indica en el Cuadro 11; y

$A$  es la actividad inicial del radionucleido de que se trate, contenido en la fuente adyacente, (Bq).

En el enfoque riesgo, la dosis absorbida ponderada según EBR (Gy-Eq) en el tejido blando debida a una fuente adyacente de actividad  $A$  según el escenario bolsillo viene dada por:

$$AD_{1,I}(A) = AF_{1,I} \times T_1 \times A, \quad (15)$$

donde:

$AD_{1,I}(A)$  es la dosis ponderada según EBR en tejido blando según el Escenario I causada por una fuente adyacente con una actividad  $A$ , (Gy-Eq);

$AF_{1,I}$  es el factor de conversión de la tasa de dosis ponderada según EBR en tejido blando según el escenario bolsillo, ((Gy-Eq)/(Bqxs)), y se muestra en el Cuadro 14 y el Cuadro 15;

$T_1$  es la duración de la exposición para el Escenario I, (s), y se indica en el Cuadro 11; y

$A$  es la actividad inicial del radionucleido de que se trate, contenido en la fuente adyacente, (Bq).

### II.1.2. Escenario II: escenario “habitación”

El Escenario II se denomina escenario “habitación”. Se utilizó para determinar la cantidad de material radiactivo que cabría considerar como peligrosa si se dejara sin blindaje en un espacio habitado (p. ej. un dormitorio o un lugar de trabajo) por un periodo prolongado. La exposición externa debida a una fuente distante sin blindaje en una habitación es una causa común de lesiones graves inducidas por radiación y de muertes relacionadas con fuentes incontroladas, bien sean robadas o perdidas (véase el Apéndice VII). En este escenario se supuso que una fuente encapsulada sin blindaje causaba la exposición de todo el cuerpo a una distancia de 1 metro aproximadamente durante 100 horas.

Existe una fuerte dependencia entre la aparición de efectos deterministas graves por exposición de todo el cuerpo, y la tasa de dosis y la duración de la exposición. La experiencia [13, 15] sugiere que la tasa de dosis que puede dar lugar a una dosis absorbida por encima de los niveles de referencia en 100 horas (p. ej. 10 mGy/h a la médula roja) es un confín inferior razonable para la evaluación. Así se obtiene la tasa de exposición que puede ocasionar efectos deterministas graves, debida a una fuente incontrolada que permanezca en un lugar cercano inadvertidamente (p. ej. en una habitación). Es especialmente adecuada si se trata de una exposición fraccionada. Las hipótesis se sustentan en experiencias documentadas, según las cuales la fuente más pequeña que se notificó (véase el Apéndice VII) que hubiera ocasionado fallecimientos accidentales en el escenario habitación produjo una tasa de dosis a la médula roja de 20-50 mGy/h a 1 metro de distancia. En consecuencia, la duración de la exposición para el escenario "habitación" se fijó en 100 horas.

Si fuese necesaria una masa de una fuente sin blindaje superior a  $1 \times 10^6$  g para producir una tasa de dosis de 10 mGy/h, la fuente debería considerarse ilimitada, ya que se estimó prácticamente imposible que tal masa produjese esta tasa de dosis debido a las limitaciones resultantes del autoblandaje. Por

consiguiente, se estableció una masa de  $1 \times 10^6$  g como el límite de masa para el escenario “habitación”. Los parámetros aplicables al Escenario II se enumeran en el Cuadro 11.

En el enfoque experto, se utiliza la exposición del torso a una fuente situada a 1 m de distancia para determinar los valores  $D_1$  con arreglo al Escenario II. Para simplificar se supone que la dosis a la médula ósea roja puede utilizarse como valor aproximado de la dosis a todos los órganos del torso. La dosis absorbida en el torso causada por una fuente radiactiva de actividad inicial A, a una distancia de 1 metro, viene dada por:

$$D_{7,II}^{L+H}(A) = DF_{2,II}^{L+H} \times T_{II} \times A, \quad (16)$$

donde:

$D_{7,II}^{L+H}(A)$  es la dosis absorbida en el torso a 1 m originada por una fuente de actividad A, (Gy);

$DF_{2,II}^{L+H}$  es el factor de conversión de tasa de dosis absorbida para una exposición externa de la médula roja<sup>6</sup> debida a una fuente que está a 1 m del cuerpo, (Gy/(Bq×s)). Para una TLE alta se indica en el Cuadro 13 y para TLE baja es numéricamente igual al factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR dado en el Cuadro 15;

$T_{II}$  es la duración de la exposición para el Escenario II, (s), y figura en el Cuadro 11; y

A es la actividad inicial del radionucleido de que se trate, contenido en la fuente distante, (Bq).

En el enfoque riesgo se utiliza la exposición del torso a una fuente a 1 m de distancia para determinar los valores  $D_1$  según el Escenario II. Para simplificar se supone que la dosis a la médula ósea roja puede utilizarse como valor aproximado de la dosis a todos los órganos del torso. La dosis ponderada según EBR en el torso causada por una fuente de actividad inicial A a una distancia de 1 m viene dada por:

$$AD_{7,II}(A) = AF_{2,II} \times T_{II} \times A \quad (17)$$

donde:

$AD_{7,II}(A)$  es la tasa de dosis ponderada según EBR en el torso a 1 m de una fuente de actividad A, (Gy-Eq);

$AF_{2,II}$  es el factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR para la exposición externa de la médula roja<sup>6</sup> a 1 m de una fuente, ((Gy-Eq)/(Bqxs)), y se indica en los Cuadros 14 y 15;

$T_{II}$  es la duración de la exposición para el Escenario II, (s), y se muestra en el Cuadro 11; y

A es la actividad inicial del radionucleido de que se trate, contenido en la fuente distante, (Bq).

---

<sup>6</sup> Para simplificar se supone que la dosis a la médula ósea roja puede utilizarse como valor aproximado de la dosis a todos los órganos del torso.

## II.2. EXPOSICIÓN A MATERIAL DISPERSADO

El material radiactivo dispersado se origina por fuga, desmantelamiento u otra forma de desarticulación de una fuente radiactiva sellada, como en un incendio o una explosión (p. ej. de un dispositivo DDR). La dispersión de una fuente radiactiva que contenga un gas noble radiactivo puede dar lugar a la exposición externa de todo el cuerpo por inmersión en una nube local. La dispersión de una fuente radiactiva que no contenga un gas noble radiactivo puede causar contaminación en las inmediaciones. A su vez, esta contaminación puede causar exposición interna y exposición por contacto de la piel.

### II.2.1. Escenarios IIIE y IIIR: escenarios "inhalación"

El Escenario III se denomina escenario "inhalación". Este escenario se utilizó para determinar la cantidad de material radiactivo dispersable que cabría considerar peligrosa debido al riesgo de su inhalación. La exposición interna por inhalación de material suspendido en la atmósfera puede causar efectos deterministas graves radioinducidos relacionados con el material radiactivo dispersado como resultado de un incendio o una explosión.

Las características dosimétricas del material en suspensión atmosférica dependen de sus propiedades químicas y físicas. En el caso de inhalación, el material particulado se asigna a uno de los tres tipos por defecto de absorción pulmonar definidos en el modelo del tracto respiratorio humano de la CIPR [16]. Los gases y vapores radiactivos, caso de ser inhalados, se asignan también a una de las tres clases, según sea el patrón inicial de absorción en el tracto respiratorio. En los enfoques experto (Escenario IIIE) y riesgo (Escenario IIIR) los materiales radiactivos dispersados en una emergencia se asignaron a distintos tipos de absorción, como se detalla seguidamente.

La cantidad de material radiactivo inhalada, considerada en relación con la masa de la fuente, se denomina la "fracción de incorporación respirable",  $F_{III}$ . Es producto de dos factores: la fracción de liberación respirable de la actividad inicial (denotada por su sigla en inglés RRF, respirable release fraction), y la fracción de incorporación por inhalación (también denotada por su sigla en inglés  $IF_H$ , inhalation intake fraction):

$$F_{III} = RRF \times IF_H, \quad (18)$$

donde:

- a) La fracción de liberación respirable de la actividad inicial, RRF, es la fracción de material dispersable que puede ser liberada en forma de aerosol con un DAMA inferior a  $10 \mu\text{m}$ . Las RRF más elevadas documentadas corresponden a incendios que afectaron a material volátil o combustible [33], o a explosiones que afectaron a polvos finos [34]. Para estas formas de material, un valor en torno a 0,1 [33, 34] es un límite superior razonable de RRF. En la mayoría de los materiales considerados dispersables, una RRF de 0,1 superaría ampliamente el valor real [33, 34]. Por lo tanto, se utilizó este valor conservador para evaluar  $F_{III}$  en la ecuación (18).
- b) La fracción de incorporación por inhalación,  $IF_H$ , es la cantidad de la fracción respirable que se supone es inhalada por el individuo durante una emergencia. Se supuso un valor  $IF_H$  de  $1 \times 10^{-3}$ , que es coherente con la fracción de aire inhalado por una persona que permanezca en una habitación de  $300 \text{ m}^3$  durante 0,5 horas [35]. Este valor supera ampliamente la fracción de incorporación de  $1 \times 10^{-6}$  considerada razonable para una persona situada a 100 m de distancia de una emisión en forma de suspensión atmosférica (p. ej. material en un incendio o una explosión) [33]. Una concentración atmosférica que pueda dar lugar a una incorporación superior a  $1 \times 10^{-6}$  origina humo denso y pequeños fragmentos [33] y cabe prever que una persona se alejaría con bastante rapidez de una nube de ese tipo.

Por consiguiente, se consideró que el valor de  $1 \times 10^{-3}$  era probablemente el confín superior conservador de la fracción de incorporación y se utilizó para evaluar  $F_{III}$  en la ecuación (18).

Por lo tanto, se supone que la "fracción de incorporación respirable",  $F_{III}$ , es  $1 \times 10^{-4}$  del material radiactivo presente en la fuente.

Los antecedentes existentes indican que la máxima incorporación por inhalación constatada en un accidente fue de unos 100 g [33]. Por consiguiente, teniendo este dato en cuenta, se fijó el valor de  $1 \times 10^6$  g para  $F_{III}$  como límite de masa en este escenario. Los parámetros para los Escenarios IIIE y IIIR figuran en el Cuadro 11.

En el enfoque experto (Escenario IIIE), para la dosis al pulmón y a la médula roja, se asignó el material dispersado e inhalado a cualquier tipo de absorción pulmonar válido para la exposición del público, como se indica en el Cuadro II-VIII de la Ref. [11]. Además, se supuso que el material inhalado pertenecía al tipo o presentaba la forma que diese lugar a la dosis más elevada en la región torácica del tracto respiratorio. Se tomó un valor de  $1 \mu\text{m}$  para el DAMA del material particulado en suspensión atmosférica. Para la tiroides el material inhalado fue de la clase 'D' según la Ref. [28]. En el enfoque experto, la dosis absorbida comprometida en el tejido T causada por inhalación de material suspendido en la atmósfera viene dada por:

$$D_{T,III E}^R(A, \Delta) = DF_{T,III E}^R(\Delta) \times F_{III} \times A, \quad (19)$$

donde:

$D_{T,III E}^R(A, \Delta)$  es la dosis absorbida comprometida causada por la radiación R, en el tiempo  $\Delta$  siguiente a la incorporación en el órgano o tejido T por inhalación de material radiactivo producido por la dispersión de una fuente con una actividad inicial A, (Gy);

$\Delta$  es el intervalo de tiempo para determinar la dosis comprometida, y se indica en el Cuadro 6;

$DF_{T,III E}^R(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis absorbida comprometida de la radiación R en el órgano o tejido T por inhalación, (Gy/Bq), y se indica en los Cuadros 16 y 17;

$F_{III}$  es la fracción de incorporación respirable para el Escenario III y figura en el Cuadro 11; y

A es la actividad inicial del radionucleido de que se trate, contenido en la fuente dispersada, (Bq).

En el enfoque riesgo (Escenario IIIR) se supuso que el material dispersado e inhalado no se modificaría químicamente después de la dispersión, podría presentarse en cualquier forma de suspensión atmosférica y ser asignado a cualquiera de los tipos de absorción válidos para la exposición ocupacional indicados en los Cuadros II-V y II-IX de la Ref. [11]. Además, se supuso que el material inhalado pertenecía al tipo o presentaba la forma que produjese la dosis más elevada en el órgano afectado. Se tomó un valor para el DAMA de  $1 \mu\text{m}$ . En el enfoque riesgo, la dosis ponderada según EBR comprometida al tejido T, causada por inhalación de material suspendido en la atmósfera, viene dada por:

$$AD_{T,IIIR}(A, \Delta) = AF_{T,IIIR}(\Delta) \times F_{III} \times A, \quad (20)$$

donde:

$AD_{T,III}(A, \Delta)$  es la dosis ponderada según EBR comprometida, en el tiempo  $\Delta$  siguiente a la incorporación en el órgano o tejido T por inhalación de material radiactivo producido por la dispersión de una fuente con una actividad inicial A, (Gy-Eq);

$\Delta$  es el intervalo de tiempo para determinar la dosis comprometida, y se indica en el Cuadro 9;

$AF_{T,III}(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis ponderada según EBR comprometida en el órgano o tejido T por inhalación, ((Gy-Eq)/Bq), y figura en el Cuadro 18;

$F_{III}$  es la fracción de incorporación respirable resultante del Escenario III, y se presenta en el Cuadro 11; y

A es la actividad inicial del radionucleido de que se trate, contenido en la fuente dispersada, (Bq).

## II.2.2. Escenario IV: escenario "ingestión"

El Escenario IV se denomina escenario "ingestión". Este escenario se utilizó para determinar la cantidad de material radiactivo dispersable que sería considerada peligrosa debido al riesgo de ingerirlo. La exposición interna debida a la incorporación de material radiactivo por ingestión puede causar efectos deterministas graves radioinducidos resultantes de fuentes que contengan radionucleidos y presenten fugas o de material radiactivo soluble dispersado en una masa de agua potable.

La cantidad de material radiactivo ingerida, considerada en relación con la masa de la fuente, se denomina la "fracción de incorporación por ingestión",  $F_{IV}$ . Según los antecedentes al respecto, la fracción de incorporación por ingestión más alta jamás documentada fue la del accidente de Goiânia [36]. En el curso de este accidente se robó y dispersó una fuente que contenía 51 TBq de un polvo muy fino de una forma hidrosoluble del  $^{137}\text{Cs}$ , lo cual ocasionó la ingestión involuntaria de aproximadamente 1 GBq de  $^{137}\text{Cs}$  por parte de un niño. Esta cantidad representaba en torno a  $1 \times 10^{-5}$  del material presente en la fuente. En consecuencia, sobre la base de tal experiencia, se supuso en este escenario una incorporación por ingestión involuntaria de  $1 \times 10^{-5}$  del material radiactivo presente en la fuente.

La fracción de incorporación por ingestión para la contaminación de una fuente de agua potable se estimó aplicando las siguientes consideraciones conservadoras:

- a) el material radiactivo es 100% hidrosoluble;
- b) el material radiactivo se mezcla uniformemente en un volumen de  $1 \times 10^6$  litros de agua, muy inferior al que circula por prácticamente cualquier sistema de suministro público de agua en una ciudad; y
- c) una persona bebe 2 litros de agua contaminada al día durante un periodo de 5 días.

De estas hipótesis resulta una incorporación proyectada, por ingesta de agua contaminada, cuyo valor aproximado es de  $1 \times 10^{-5}$  del material de la fuente dispersada. En consecuencia, se considera razonable utilizar una fracción de incorporación por ingestión ( $F_{IV}$ ) de  $1 \times 10^{-5}$  para los dos casos de ingestión de agua contaminada, es decir, de forma involuntaria o de otra forma.

En el Escenario IV se fijó el valor máximo de  $1 \times 10^6$  g para el límite de masa de material dispersable. Este valor es el mismo que el utilizado en el Escenario III. Los parámetros para el Escenario IV se presentan en el Cuadro 11.

Los factores de conversión de dosis absorbida por unidad de actividad incorporada por ingestión son, en general, del mismo orden de magnitud que en el caso de la incorporación por inhalación. Además, se supuso que la incorporación por inhalación es 10 veces más elevada que la incorporación por ingestión. En consecuencia, en el enfoque experto no se consideró explícitamente la ingestión, ya que, para la incorporación, el escenario inhalación es el determinante.

En el enfoque riesgo se supuso que el material no se modificaría químicamente después de la dispersión y que podría ser asignado al tipo de ingestión dado en el Cuadro II-IV de la Ref. [11], lo cual daría lugar a la dosis ponderada según EBR comprometida más elevada en el órgano considerado. En el enfoque experto la dosis absorbida comprometida en el tejido T causada por ingestión del material dispersado viene dada por:

$$AD_{T,IV}(A, \Delta) = AF_{T,IV}(\Delta) \times F_{IV} \times A, \quad (21)$$

donde:

$AD_{T,IV}(A, \Delta)$  es la dosis ponderada según EBR comprometida, en el tiempo  $\Delta$  siguiente a la incorporación, en el órgano T por ingestión de material radiactivo producido por la dispersión de una fuente con una actividad inicial A, (Gy-Eq);

$\Delta$  es el intervalo de tiempo para determinar la dosis comprometida, y figura en el Cuadro 9;

$AF_{T,IV}(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis ponderada según EBR comprometida en el órgano T por ingestión, ((Gy-Eq)/Bq), y se presenta en el Cuadro 19;

$F_{IV}$  es la fracción de incorporación por ingestión para el Escenario IV y figura en el Cuadro 11; y

A es la actividad inicial del radionucleido de que se trate, contenido en la fuente dispersada, (Bq).

### II.2.3. Escenario V: escenario "contaminación"

El Escenario V se denomina escenario "contaminación". Este escenario se utilizó para determinar la cantidad de material radiactivo dispersable que cabría considerar peligrosa debido a la irradiación por contacto de una zona localizada de la piel. La exposición externa de la piel por contacto, debida a material radiactivo repartido sobre una zona localizada de la superficie corporal, puede causar en la piel efectos deterministas graves en la salud. La experiencia muestra también [37] que si los efectos deterministas graves en la piel van acompañados de una exposición de todo el cuerpo, ello puede ocasionar otras lesiones radioinducidas y la muerte. En este escenario se utilizó el escenario de contaminación de la piel de la Ref. [35] para fijar los parámetros. En el Escenario V se supone que una fracción de  $1 \times 10^{-2}$  ( $F_v$  en el Cuadro 11) del material radiactivo escapa de una fuente y contamina uniformemente una superficie de  $1 \text{ m}^2$  de extensión ( $S_v$  en el Cuadro 11). Esta contaminación superficial da lugar a su vez a una contaminación de la piel del 10% del valor superficial ( $R_v$  en el Cuadro 11). Se supone que la piel está expuesta durante 5 horas ( $T_v$  en el Cuadro 11).

Se supuso un espesor máximo de contaminación incontrolada de la mano de  $0,1 \text{ g/cm}^2$  aproximadamente. En consecuencia, teniendo en cuenta los parámetros para la exposición por contacto al material dispersado, se fijó un valor de  $1 \times 10^6 \text{ g}$  como límite de masa del material dispersable. Los parámetros para el Escenario V se presentan en el Cuadro 11.

En los enfoques experto y riesgo se utilizó el Escenario V para evaluar la dosis debida a exposición por contacto de distintas regiones de la piel, como se analiza en los Apéndices V y VI.

En el enfoque experto, la dosis absorbida a la membrana basal de la piel (Tejido 6E) viene dada por:

$$D_{6E,V}^L(A) = \frac{R_V \times T_V \times DF_{6E,V}^L \times F_V}{S_V} A, \quad (22)$$

donde:

$D_{6E,V}^L(A)$  es la dosis absorbida en la membrana basal de la piel causada por la dispersión del material radiactivo de una fuente con una actividad inicial A, (Gy);

$DF_{6E,V}^L$  es el factor de conversión de dosis absorbida aplicable a la membrana basal de la piel por contaminación de la piel, (Gy/(Bq×s/cm<sup>2</sup>)), y se indica en el Cuadro 16;

$S_V$ ,  $F_V$ ,  $R_V$  y  $T_V$  son los parámetros para el Escenario V y se presentan en el Cuadro 11; y

A es la actividad inicial del radionucleido de que se trate, contenido en la fuente dispersada, (Bq).

En el enfoque riesgo, la dosis absorbida ponderada según EBR en la dermis (Tejido 6R) viene dada por:

$$AD_{6R,V}(A) = \frac{R_V \times T_V \times AF_{6R,V} \times F_V}{S_V} A, \quad (23)$$

donde:

$AD_{6R,V}(A)$  es la dosis ponderada según EBR en la dermis causada por la dispersión de una fuente con una actividad inicial A, (Gy-Eq);

$AF_{6R,V}$  es el factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR para la exposición por contacto de la dermis, ((Gy-Eq)/(s×Bq/cm<sup>2</sup>)), y se indica en el Cuadro 19;

$S_V$ ,  $F_V$ ,  $R_V$  y  $T_V$  son los parámetros para el Escenario V y se presentan en el Cuadro 11; y

A es la actividad inicial del radionucleido de que se trate, contenido en la fuente dispersada, (Bq).

#### II.2.4. Escenario VI: escenario "inmersión"

El Escenario VI se denomina escenario "inmersión". Este escenario se utilizó para determinar la cantidad de gas noble radiactivo que, si se dispersara en una habitación, cabría considerar peligrosa como fuente de exposición externa. El escenario exposición de la Ref. [35] se utilizó como base para el escenario "inmersión". En el Escenario VI se supone que el gas noble se dispersa uniformemente en una habitación de 300 m<sup>3</sup> y que una persona situada en la habitación está expuesta durante 0,5 horas. No se consideró la dilución del gas radiactivo debida al intercambio de aire. La inmersión en una habitación se considera limitativa, dado que cualquier dispersión de gas noble en un entorno exterior daría lugar a una dispersión muy rápida y a concentraciones muy inferiores.

En el Escenario VI se fijó un valor máximo de 1×10<sup>6</sup> g para el límite de masa de material dispersable. Este valor es el mismo que el utilizado en el Escenario III. Los parámetros para el Escenario VI se presentan en el Cuadro 11.

En el enfoque experto, la dosis absorbida en el torso por una exposición externa debida a la inmersión en un gas noble radiactivo viene dada por:

$$D_{7,VI}^L(A) = \frac{T_{VI} \times F_{VI} \times DF_{2,VI}^L}{V_{VI}} A , \quad (24)$$

donde:

$D_{7,VI}^L(A)$  es la dosis absorbida causada por una radiación de baja TLE en el torso debida a exposición externa por inmersión en un gas noble radiactivo originada por la dispersión de una fuente con una actividad inicial A, (Gy);

$DF_{2,VI}^L$  es el factor de conversión de tasa de dosis absorbida para exposición externa de la médula roja<sup>7</sup> debida a inmersión en el gas noble radiactivo, (Gy/(Bq×s/m<sup>3</sup>)). Para la inmersión en radionucleidos emisores de radiación de baja TLE, el valor del factor de conversión de tasa de dosis absorbida,  $DF_{2,VI}^L$ , se consideró numéricamente igual al factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR,  $AF_{2,VI}$ , aplicable al mismo radionucleido. Los factores correspondientes a los radionucleidos de interés se presentan en el Cuadro 20;

$F_{VI}$ ,  $V_{VI}$  y  $T_{VI}$  son los parámetros para el Escenario VI y figuran en el Cuadro 11;

A es la actividad inicial del radionucleido de que se trate, contenido en la fuente dispersada, (Bq).

En el enfoque riesgo, la dosis ponderada según EBR en el torso debida a exposición externa por inmersión en un gas noble radiactivo viene dada por:

$$AD_{7,VI}(A) = \frac{T_{VI} \times F_{VI} \times AF_{2,VI}}{V_{VI}} A , \quad (25)$$

donde:

$AD_{7,VI}(A)$  es la dosis ponderada según EBR en el torso debida a exposición externa por inmersión en el gas noble radiactivo originada por la dispersión de una fuente con una actividad inicial A, (Gy-Eq);

$AF_{2,VI}$  es el factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR para exposición externa de la médula roja<sup>7</sup> debida a la inmersión en el gas noble radiactivo, ((Gy-Eq)/(Bq×s/m<sup>3</sup>)), y se indica en el Cuadro 20;

$F_{VI}$ ,  $V_{VI}$  y  $T_{VI}$  son los parámetros para el Escenario VI y se presentan en el Cuadro 11; y

A es la actividad inicial del radionucleido de que se trate, contenido en la fuente dispersada, (Bq).

### II.3. RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DE LOS ESCENARIOS

El Cuadro 11 contiene un resumen de los parámetros de los escenarios utilizados para establecer los valores D.

---

<sup>7</sup> Para simplificar se supuso que la dosis a la médula ósea roja puede utilizarse como valor aproximado de la dosis a todos los órganos del torso.

CUADRO 11. PARÁMETROS DE LOS ESCENARIOS UTILIZADOS PARA ESTABLECER LOS VALORES D

| Escenario |                            | Parámetro        |                                   |  |
|-----------|----------------------------|------------------|-----------------------------------|--|
|           | Título                     | Símbolo          | Valor                             | Definición   |
| I         | "Bolsillo"                 | T <sub>I</sub>   | 3.6×10 <sup>4</sup> s             | Duración de la exposición                                |
|           |                            | M <sub>I</sub>   | 5×10 <sup>2</sup> g               | Límite de masa   |
| II        | "Habitación"               | T <sub>II</sub>  | 3.6×10 <sup>5</sup> s             | Duración de la exposición                                |
|           |                            | M <sub>II</sub>  | 1×10 <sup>6</sup> g               | Límite de masa   |
| III       | "Inhalación"               | F <sub>III</sub> | 1×10 <sup>-4</sup>                | Fracción de incorporación respirable                     |
|           |                            | M <sub>III</sub> | 1×10 <sup>6</sup> g               | Límite de masa   |
| IV        | "Ingestión"                | F <sub>IV</sub>  | 1×10 <sup>-5</sup>                | Fracción de incorporación por ingestión                  |
|           |                            | M <sub>IV</sub>  | 1×10 <sup>6</sup> g               | Límite de masa   |
| V         | "Contaminación de la piel" | F <sub>V</sub>   | 1×10 <sup>-2</sup>                | Fracción de material dispersado                          |
|           |                            | S <sub>V</sub>   | 1×10 <sup>4</sup> cm <sup>2</sup> | Área de superficie contaminada                           |
|           |                            | R <sub>V</sub>   | 1×10 <sup>-1</sup>                | Razón entre la contaminación de la piel y la superficial |
|           |                            | T <sub>V</sub>   | 1.8×10 <sup>4</sup> s             | Duración de la exposición                                |
|           |                            | M <sub>V</sub>   | 1×10 <sup>6</sup> g               | Límite de masa   |
| VI        | "Inmersión"                | F <sub>VI</sub>  | 1                                 | Fracción de material liberado en la habitación           |
|           |                            | V <sub>VI</sub>  | 3×10 <sup>2</sup> m <sup>3</sup>  | Volumen de la habitación                                 |
|           |                            | T <sub>VI</sub>  | 1.8×10 <sup>3</sup> s             | Duración de la exposición                                |
|           |                            | M <sub>VI</sub>  | 1×10 <sup>6</sup> g               | Límite de masa   |

### APÉNDICE III CÁLCULO DE LOS VALORES D

El esquema para fijar los valores D de un radionucleido determinado se basó en algoritmos mediante los que se halla la actividad mínima de un radionucleido de una fuente que pudiera originar efectos deterministas graves si no estuviera bajo control. En los enfoques experto y riesgo se utilizaron algoritmos diferentes al examinar los escenarios y los criterios relativos a la aparición de efectos deterministas graves en la salud. En cada escenario y enfoque se calculó la actividad inicial A (Bq) que pudiera causar efectos deterministas graves. El valor D se estableció normalmente como la actividad mínima calculada para los escenarios aplicables. No obstante, al establecer los valores D se evaluó también la masa de la actividad que se consideraba peligrosa, a fin de determinar si era demasiado grande como para constituir una amenaza creíble (ilimitada) o de comprobar si la masa excedía algún límite establecido para asegurarse de que la criticidad no constituía un motivo de preocupación.

Esta sección presenta un resumen de los algoritmos utilizados en el cálculo de los valores D. El fundamento de los parámetros que describen los escenarios se expone en el Apéndice II, y el fundamento de los criterios de aparición de efectos deterministas graves, en el Apéndice I.

#### III.1. EL ENFOQUE EXPERTO

##### III.1.1.I. Cálculo del VALOR ${}^E D_1$

El esquema de cálculo del valor  ${}^E D_1$  se muestra en la Fig. 2. Incluye dos escenarios de exposición externa:

- El escenario “bolsillo” (Escenario I) que consiste en una exposición local causada por una fuente adyacente; y
- El escenario “habitación” (Escenario II) que consiste en una exposición de todo el cuerpo debida a una fuente distante.

*Escenario bolsillo.* La actividad inicial  ${}^E A_{1,I}$ , (Bq), que, según el enfoque experto, puede originar efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 1 (tejido blando) con arreglo al Escenario I, (escenario “bolsillo”) es la solución de la ecuación (14) para una dosis igual a  $RD_1^{L+H}$ , y viene dada por:

$${}^E A_{1,I} = \frac{1}{T_1 \times DF_{1,I}^{L+H}} RD_1^{L+H}, \quad (26)$$

donde:

$RD_1^{L+H}$  es el nivel de referencia de dosis absorbida para la aparición de efectos deterministas graves en la salud en tejido blando (Gy), y se muestra en el Cuadro 5;

$DF_{1,I}^{L+H}$  es el factor de conversión de dosis absorbida para la dosis absorbida en tejido blando según el escenario bolsillo, (Gy/(Bqxs)). Para una TLE alta se indica en el Cuadro 13 y para una TLE baja es numéricamente igual al factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR,  $AF_{1,I}$ , mostrado en el Cuadro 15; y

$T_1$  es la duración de la exposición en el Escenario I, (s), y figura en el Cuadro 11.

*Escenario habitación.* En este escenario se supuso una irradiación del torso como resultado de una exposición a una fuente situada a 1 metro aproximadamente de la superficie corporal. Para simplificar

se considera, en base a la Ref. [11], que la dosis a la médula ósea roja puede utilizarse como valor aproximado de la dosis a todos los órganos del torso. La actividad inicial  ${}^E A_{7,II}$ , (Bq), que, según el enfoque experto, puede originar efectos deterministas graves en el Tejido 7 (torso) con arreglo al Escenario II (escenario “habitación”) es la solución de la ecuación (16) para una dosis igual a  $RD_7^{L+H}$ , y viene dada por:

$${}^E A_{7,II} = \frac{1}{T_{II} \times DF_{2,II}^{L+H}} RD_7^{L+H}, \quad (27)$$

donde:

$RD_7^{L+H}$  es el nivel de referencia de dosis absorbida para la aparición de efectos deterministas graves en la salud en el torso por exposición externa, (Gy), y se indica en el Cuadro 5;

$DF_{2,II}^{L+H}$  es el factor de conversión de tasa de dosis absorbida por exposición externa de la médula roja<sup>8</sup> causada por una fuente situada a 1 m del cuerpo, (Gy/(Bqxs)). Para una TLE alta figura en el Cuadro 13 y para una TLE baja es numéricamente igual al factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR,  $AF_{2,II}$ , mostrado en el Cuadro 15; y

$T_{II}$  es la duración de la exposición en el Escenario II, (s), y figura en el Cuadro 11.

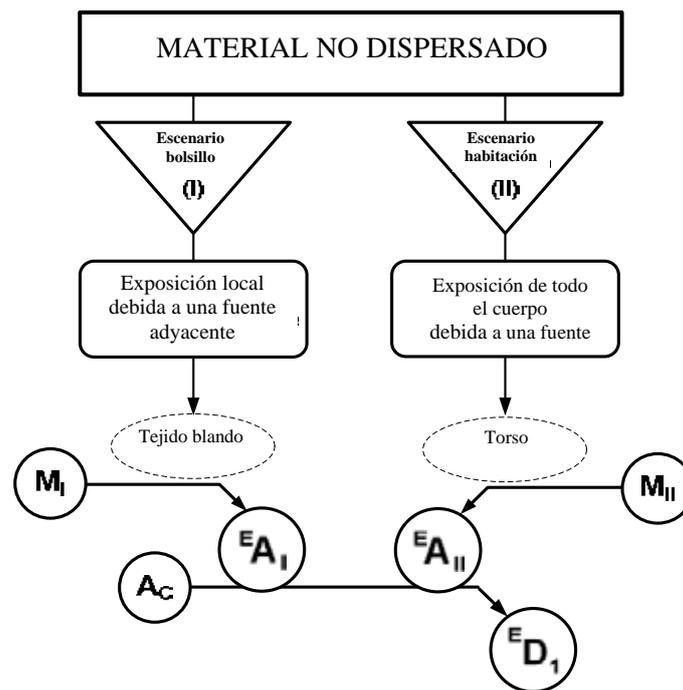


FIG. 2. Esquema de cálculo del valor  ${}^E D_1$ .

<sup>8</sup> Para simplificar, se supone que la dosis a la médula ósea roja puede utilizarse como valor aproximado de la dosis a todos los órganos del torso.

Establecimiento del valor  ${}^E D_1$ . El valor  ${}^E D_1$  es el mínimo de las siguientes tres actividades:

$${}^E D_1 = \min\{{}^E A_I, {}^E A_{II}, A_C\}, \quad (28)$$

donde:

$A_C$  es la actividad equivalente al límite de criticidad de la masa, (Bq), y se indica en el Cuadro 28;

${}^E A_I$  y  ${}^E A_{II}$  son las actividades iniciales de un radionucleido que se considera peligroso cuenta habida de su masa, como se definen en las ecuaciones (29) y (30), (Bq):

$${}^E A_I = \begin{cases} {}^E A_{I,I} & \text{if } M \leq M_I \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_I \end{cases}, \quad (29)$$

donde:

${}^E A_{I,I}$  es la actividad inicial dada por la ecuación (26), (Bq);

$M$  es la masa<sup>9</sup> de material cuya actividad es  ${}^E A_{I,I}$ , (g); y

$M_I$  es el límite de masa para el Escenario I, (g), y se indica en el Cuadro 11.

y

$${}^E A_{II} = \begin{cases} {}^E A_{7,II} & \text{if } M \leq M_{II} \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_{II} \end{cases}, \quad (30)$$

donde:

${}^E A_{7,II}$  es la actividad inicial dada por la ecuación (27), (Bq);

$M$  es la masa<sup>9</sup> del material cuya actividad es  ${}^E A_{7,II}$ , (g); y

$M_{II}$  es el límite de masa (g) para el Escenario II indicado en el Cuadro 11.

El valor  ${}^E D_1$  de un radionucleido es ilimitado (unlimited) si los valores de  ${}^E A_I$ ,  ${}^E A_{II}$  y  $A_C$  para dicho radionucleido lo son. Los valores  ${}^E D_1$  se enumeran en el Cuadro 1 y en el Cuadro 24.

### III.1.2. Cálculo del VALOR ${}^E D_2$

El esquema de cálculo del valor  ${}^E D_2$  se muestra en la Fig. 3. Incluye cuatro escenarios de exposición a material radiactivo dispersado:

- a) Inhalación (Escenario III E);
- b) Ingestión (Escenario IV);
- c) Contaminación de la piel (Escenario V); y
- d) Inmersión en un gas noble radiactivo (Escenario VI).

---

<sup>9</sup> La masa del material radiactivo (g) es igual a su actividad (Bq) dividida por su actividad específica (Bq/g) como se muestra en el Cuadro 26.

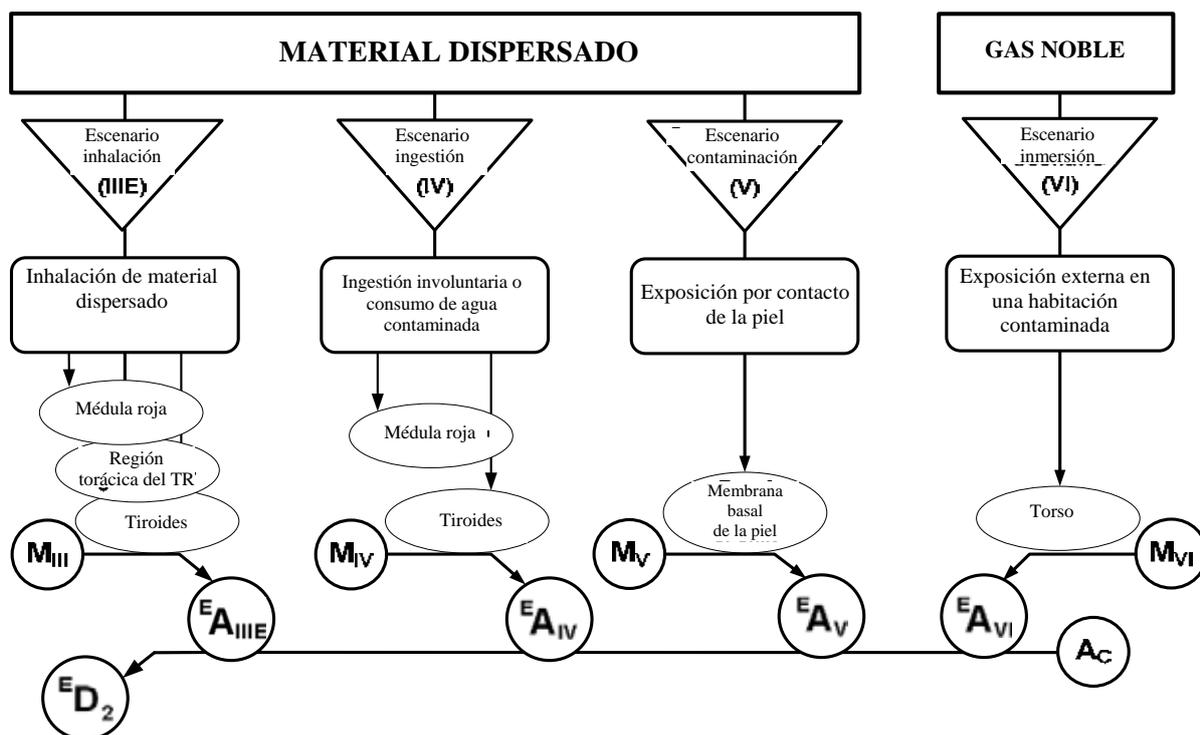


FIG. 3. Esquema de cálculo del valor  ${}^E D_2$ .

*Inhalación.* Se analizó la exposición de la médula roja (Tejido 2), de la región torácica del tracto respiratorio (Tejido 3E) y de la tiroides (Tejido 5) a raíz de una inhalación.

La actividad inicial  ${}^E A_{2,III E}$ , (Bq), que, según el enfoque experto, puede originar efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 2 (médula roja) con arreglo al Escenario III (inhalación) es la solución de la ecuación (19) para una dosis igual a  $RD_2^{L+H}(\Delta)$ , y viene dada por:

$${}^E A_{2,III E} = \frac{1}{F_{III} \times DF_{2,III E}^{L+H}(\Delta)} RD_2^{L+H}(\Delta), \quad (31)$$

donde:

$RD_2^{L+H}(\Delta)$  es el nivel de referencia de la dosis absorbida comprometida a lo largo de 2 días en caso de exposición interna de la médula roja para la aparición de efectos deterministas graves en la salud (Gy), y se muestra en el Cuadro 6;

$DF_{2,III E}^{L+H}(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis absorbida comprometida a lo largo de 2 días en caso de exposición interna de la médula roja debida a inhalación (Gy/Bq), y se indica en el Cuadro 16; y

$F_{III}$  es la fracción de incorporación respirable para el Escenario III mostrada en el Cuadro 11.

La actividad inicial  ${}^E A_{3E,III E}$ , (Bq), que, según el enfoque experto, puede ocasionar efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 3E (región torácica del tracto respiratorio) con arreglo al Escenario III E (inhalación) se calculó utilizando diferentes niveles de referencia para la aparición de efectos deterministas y diferentes factores de conversión de dosis para cada uno de los tres grupos de radionucleidos:

- a) Aerosoles tipo S<sup>10</sup> de emisores de radiación de alta TLE de periodo largo (grupo HS);
- b) El estroncio-90 en su forma <sup>90</sup>SrTiO<sub>3</sub> (grupo LS)<sup>11</sup>;
- c) Otros emisores de radiación de baja TLE (grupo L).

La actividad inicial es la solución de la ecuación (19) para una dosis igual a  $RD_{3E}^R(\Delta)$ , y viene dada por:

$${}^E A_{3E,III E} = \frac{1}{F_{III} \times DF_{3E,III E}^R(\Delta)} RD_{3E}^R(\Delta), \quad (32)$$

donde:

$RD_{3E}^R(\Delta)$  es el nivel de referencia de la dosis absorbida comprometida aplicable a una exposición interna de la región torácica del tracto respiratorio para la aparición de efectos deterministas graves en la salud en el caso de radionucleidos del grupo R (HS, LS o L), (Gy). Los valores figuran en el Cuadro 6;

$DF_{3E,III E}^R(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis absorbida comprometida aplicable a una exposición interna de la región torácica del tracto respiratorio debida a la incorporación por inhalación de un radionucleido del grupo R (HS, LS o L), (Gy/Bq). Los valores relativos a los grupos HS, L y LS se muestran en el Cuadro 16; y

$F_{III}$  es la fracción de incorporación respirable definida en el Escenario III e indicada en el Cuadro 11.

La actividad inicial  ${}^E A_{5,III E}$ , (Bq), que, según el enfoque experto, puede originar efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 5 (tiroides) con arreglo al Escenario III E, (inhalación) es la solución de la ecuación (19) para una dosis igual a  $RD_5^L(\Delta)$ , y viene dada por:

$${}^E A_{5,III E} = \frac{1}{F_{III} \times DF_{5,III E}^L(\Delta)} RD_5^L(\Delta), \quad (33)$$

donde:

$RD_5^L(\Delta)$  es el nivel de referencia de la dosis absorbida comprometida aplicable a una exposición interna de la tiroides para la aparición de efectos deterministas graves en la salud (Gy), y figura en el Cuadro 6;

$DF_{5,III E}^L(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis absorbida comprometida aplicable a una exposición interna de la tiroides debida a una incorporación por inhalación (Gy/Bq), y se indica en el Cuadro 17;

$F_{III}$  es la fracción de incorporación respirable definida en el Escenario III y se muestra en el Cuadro 11.

*Ingestión.* En el escenario “ingestión” (Escenario IV) se consideraron dos alternativas. En la primera se supuso que la fuente presentaba fugas y era manipulada, lo que ocasionaba una ingestión involuntaria de material radiactivo. En la segunda alternativa se supuso que la fuente que presentaba fugas se introducía en un sistema de suministro de agua potable, con la contaminación y consumo consiguientes. Los factores de conversión de dosis absorbida para el colon, la médula roja y la tiroides por unidad incorporada por ingestión y por inhalación son generalmente del mismo orden de

<sup>10</sup> El tipo S indica una absorción lenta por el pulmón [11].

<sup>11</sup> La inhalación de SrTiO<sub>3</sub> se considera un caso especial, como se señala en el Apéndice II.

magnitud. Por consiguiente, los valores de la actividad inicial,  ${}^E A_{T,III}$ , por inhalación calculados conforme al escenario "inhalación" (Escenario III), suponiendo una inhalación de  $10^{-4}$  del material dispersado, serían inferiores a los calculados suponiendo una fracción de incorporación por ingestión de  $10^{-5}$ , como se define en las alternativas del Escenario IV. Por tanto, se concluyó que el valor D correspondiente a la actividad inicial  ${}^E A_{T,III}$  basado en el escenario inhalación es un límite razonable por debajo del cual no cabría considerar que la ingestión fuera una amenaza significativa. En consecuencia, la exposición por ingestión del colon, la médula roja y la tiroides no se analizó por separado.

*Contaminación de la piel.* La actividad inicial  ${}^E A_{6E,V}$ , (Bq), que, según el enfoque experto, puede originar efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 6E (membrana basal de la piel) conforme al Escenario V es la solución de la ecuación (22) para una dosis igual a  $RD_{6E}^{L+H}$ , y viene dada por:

$${}^E A_{6E,V} = \frac{S_V}{F_V \times R_V \times T_V \times DF_{6E,V}^L} RD_{6E}^{L+H}, \quad (34)$$

donde:

$RD_{6E}^{L+H}$  es el nivel de referencia de la dosis absorbida en la membrana basal de la piel para la aparición de efectos deterministas graves en la salud (Gy), y se indica en el Cuadro 5;

$DF_{6E,V}^L$  es el factor de conversión de dosis absorbida por exposición por contacto de la membrana basal de la piel, (Gy/(Bq×s/cm<sup>2</sup>)), y se muestra en el Cuadro 16;

$S_V$  es el área de la superficie contaminada primaria en el Escenario V (cm<sup>2</sup>), y figura en el Cuadro 11;

$F_V$  es la fracción de material dispersado en el Escenario V, y se muestra en el Cuadro 11;

$R_V$  es la razón entre la contaminación en la piel y la contaminación superficial según el Escenario V, y se presenta en el Cuadro 11; y

$T_V$  es la duración de la exposición en el Escenario V, (s), y se muestra en el Cuadro 11.

*Inmersión.* Como el <sup>85</sup>Kr es un gas noble, su liberación es un peligro externo. La actividad inicial  ${}^E A_{7,VI}$ , (Bq), de un gas noble que, según el enfoque experto, puede originar efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 7 (torso) con arreglo al Escenario VI (inmersión) es la solución de la ecuación (24) para una dosis igual a  $RD_7^{L+H}$ , y viene dada por:

$${}^E A_{7,VI} = \frac{V_{VI}}{T_{VI} \times DF_{2,VI}^L} RD_7^{L+H}, \quad (35)$$

donde:

$RD_7^{L+H}$  es el nivel de referencia de dosis absorbida para la aparición de efectos deterministas graves en la salud en el torso debidos a exposición externa, (Gy), y se muestra en el Cuadro 5;

$DF_{2,VI}^L$  es el factor de conversión de tasa de dosis absorbida por exposición externa de la médula roja<sup>12</sup> debida a la inmersión en un gas noble radiactivo (Gy/(Bq×s/m<sup>3</sup>)). Para el <sup>85</sup>Kr se

<sup>12</sup> Para simplificar se supone que la dosis a la médula ósea roja puede utilizarse como valor aproximado de la dosis a todos los órganos del torso.

tomó un valor numérico igual al factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR  $AF_{2,VI}$  relativo al  $^{85}\text{Kr}$ . Los valores figuran en el Cuadro 20;

$V_{VI}$  es el volumen de la habitación en el Escenario VI, ( $\text{m}^3$ ), y se indica en el Cuadro 11;

$T_{VI}$  es la duración de la exposición en el Escenario VI, (s), y figura en el Cuadro 11; y

$F_{VI}$  es la fracción de material liberado en la habitación, y figura en el Cuadro 11.

*Establecimiento del valor  $^E D_2$ .* El valor  $^E D_2$  se calculó para el gas noble radiactivo  $^{85}\text{Kr}$  de manera diferente que para los otros radionucleidos.

Para los materiales distintos de los gases nobles, el valor  $^E D_2$ , (Bq), viene dado por:

$$^E D_2 = \min\{^E A_{III}, ^E A_V, A_C\}, \quad (36)$$

donde:

$A_C$  es la actividad equivalente al límite de criticidad de la masa, (Bq), y se muestra en el Cuadro 28;

$^E A_{III}$  y  $^E A_V$  son las actividades iniciales, (Bq), y vienen dadas por las ecuaciones (37) y (38):

$$^E A_{III} = \begin{cases} \min\{^E A_{2,III}, ^E A_{3E,III}, ^E A_{5,III}\} & \text{if } M \leq M_{III} \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_{III} \end{cases}, \quad (37)$$

donde:

$^E A_{2,III}$ ,  $^E A_{3E,III}$  y  $^E A_{5,III}$  son las actividades iniciales dadas por las ecuaciones (31), (32) y (33), (Bq);

$M$  es la masa<sup>9</sup> de material cuya actividad es igual a  $\min\{^E A_{2,III}, ^E A_{3E,III}, ^E A_{5,III}\}$ , (g); y

$M_{III}$  es el límite de masa para el Escenario III, (g), y figura en el Cuadro 11;

y

$$^E A_V = \begin{cases} ^E A_{6E,V} & \text{if } M \leq M_V \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_V \end{cases}, \quad (38)$$

donde:

$^E A_{6E,V}$  es la actividad inicial dada por la ecuación (34), (Bq);

$M$  es la masa<sup>9</sup> de material cuya actividad es  $^E A_{6E,V}$ , (g); y

$M_V$  es el límite de masa para el Escenario V, (g), y figura en el Cuadro 11.

Para el  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^E D_2$  es igual al valor de la actividad inicial  $^E A_{2,VI}$  definido por la ecuación (35):

$$^E D_2 \equiv ^E A_{2,VI} \quad (39)$$

El valor  $^E D_2$  para un determinado material distinto de un gas noble es ilimitado si los valores de  $A_{III}^E$ ,  $^E A_V$  y  $A_C$  lo son. También es ilimitado para un gas noble radiactivo si los valores de  $^E A_{2,VI}$  son ilimitados. Los valores  $^E D_2$  obtenidos mediante el enfoque experto se enumeran en los Cuadros 1 y 24.

## III.2. EL ENFOQUE RIESGO

### III.2.1. Cálculo del VALOR $^R D_1$

El esquema utilizado para calcular el valor  $^R D_1$  se muestra en la Figura 4. Incluye dos escenarios de exposición a una fuente de material radiactivo no dispersado:

- El escenario “bolsillo” (Escenario I) que consiste en una exposición local a una fuente adyacente; y
- El escenario “habitación” (Escenario II) que consiste en una exposición de todo el cuerpo a una fuente distante.

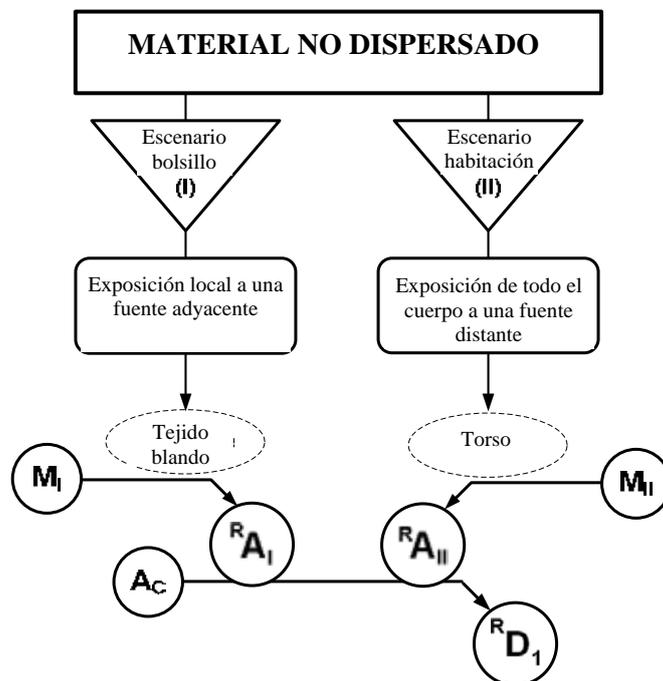


FIG. 4. Esquema para determinar el valor  $^R D_1$ .

*Escenario bolsillo.* La actividad inicial  ${}^R A_{1,I}$ , (Bq), que, según el enfoque riesgo, puede originar efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 1 (tejido blando) conforme al Escenario I, (escenario “bolsillo”) es la solución de la ecuación (15) para una dosis igual a  $TD_1$ , y viene dada por:

$${}^R A_{1,I} = \frac{1}{T_I \times AF_{1,I}} TD_1, \quad (40)$$

donde:

$TD_1$  es el nivel umbral de la dosis ponderada según EBR para la aparición de efectos deterministas graves en tejido blando (Gy-Eq), y se muestra en el Cuadro 8;

$AF_{1,I}$  es el factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR para tejido blando según el escenario bolsillo, ((Gy-Eq)/(Bqxs)), y se indica en los Cuadros 14 y 15; y

$T_I$  es la duración de la exposición para el Escenario I, (s), y figura en el Cuadro 11.

*Escenario habitación.* En este escenario se supuso una irradiación del torso como resultado de una exposición a una fuente situada a 1 metro aproximadamente de la superficie corporal. Para simplificar se supuso, basándose en las Refs. [15, 21], que la dosis en la médula ósea roja puede utilizarse como valor aproximado de la dosis en todos los órganos del torso. La actividad inicial  ${}^R A_{7,II}$ , (Bq), que, según el enfoque riesgo, puede originar efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 7 (torso) con arreglo al Escenario II, (escenario “habitación”) es la solución de la ecuación (17) para una dosis igual a  $TD_7$ , y viene dada por:

$${}^R A_{7,II} = \frac{1}{T_{II} \times AF_{2,II}} TD_7, \quad (41)$$

donde:

$TD_7$  es el nivel umbral de la dosis ponderada según EBR para la aparición de efectos deterministas graves en la salud en el torso, (Gy-Eq), y se indica en el Cuadro 8;

$AF_{2,II}$  es el factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR para exposición externa de la médula roja<sup>13</sup> a una fuente situada a una distancia de 1 m, ((Gy-Eq)/(Bqxs)), y se presenta en los Cuadros 14 y 15,

$T_{II}$  es la duración de la exposición para el Escenario II, (s), y figura en el Cuadro 11.

*Establecimiento del valor  ${}^R D_1$ .* El valor  ${}^R D_1$  es el mínimo de las tres actividades  ${}^R A_I$ ,  ${}^R A_{II}$ , y  $A_C$  y viene dado por:

$${}^R D_1 = \min\{{}^R A_I, {}^R A_{II}, A_C\}, \quad (42)$$

donde:

$A_C$  es la actividad equivalente al límite de criticidad de la masa, (Bq), y se muestra en el Cuadro 28;

---

<sup>13</sup> Para simplificar se supone que la dosis a la médula ósea roja puede utilizarse como valor aproximado de la dosis a todos los órganos del torso.

${}^R A_I, {}^R A_{II}$  son las actividades iniciales mínimas previa consideración de la masa, (Bq), definidas en las ecuaciones (43) y (44):

$${}^R A_I = \begin{cases} {}^R A_{1,I} & \text{if } M \leq M_I \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_I \end{cases}, \quad (43)$$

donde:

${}^R A_{1,I}$  es la actividad inicial, y viene dada por la ecuación (40), (Bq);

M es la masa<sup>9</sup> de material cuya actividad es  ${}^R A_{1,I}$ , (g); y

$M_I$  es el límite de masa (g) para el Escenario I indicado en el Cuadro 11;

$${}^R A_{II} = \begin{cases} {}^R A_{7,II} & \text{if } M \leq M_{II} \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_{II} \end{cases}, \quad (44)$$

donde:

${}^R A_{7,II}$  es la actividad inicial dada por la ecuación (41), (Bq);

M es la masa de material cuya actividad es  ${}^R A_{7,II}$ , (g); y

$M_{II}$  es el límite de masa para el Escenario II mostrado en el Cuadro 11.

El valor  ${}^R D_1$  para un determinado radionucleido es ilimitado si los valores de  ${}^R A_I, {}^R A_{II}$  y  $A_C$  lo son. Los valores  ${}^R D_1$  se enumeran en los Cuadros 1 y 24 (para los radionucleidos en cuyo caso también se utilizó el enfoque experto).

### III.2.2. Cálculo del VALOR ${}^R D_2$

El esquema utilizado para calcular el valor  ${}^R D_2$  se muestra en la Figura 5. Incluye cuatro escenarios de exposición a material radiactivo dispersado:

- a) Inhalación (Escenario III);
- b) Ingestión (Escenario IV);
- c) Contaminación de la piel (Escenario V); y
- d) Inmersión en un gas noble radiactivo (Escenario VI).

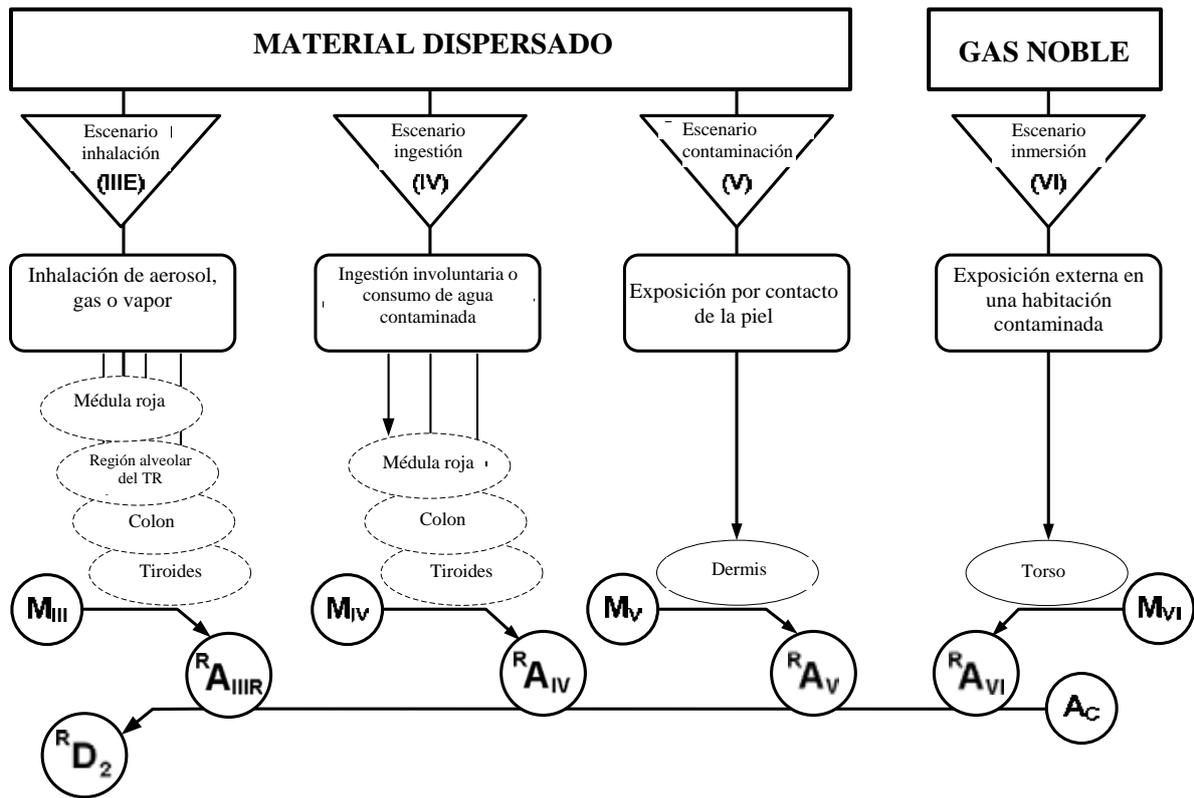


FIG. 5. Esquema para determinar el valor  ${}^R D_2$ .

*Inhalación.* Se analizó la exposición de la médula roja (Tejido 2), la región alveolar-intersticial (AI) del tracto respiratorio (Tejido 3R), el colon (Tejido 4) y la tiroides (Tejido 5) por inhalación. La actividad inicial  ${}^R A_{T,III}$ , (Bq), que, según el enfoque riesgo, puede originar efectos deterministas graves en la salud en el tejido  $T^{14}$  conforme al Escenario III, (inhalación) es la solución de la ecuación (20) para una dosis igual a  $TD_T(\Delta)$ , y viene dada por:

$${}^R A_{T,III} = \frac{1}{F_{III} \times AF_{T,III}(\Delta)} TD_T(\Delta), \quad (45)$$

donde:

$TD_T(\Delta)$  es el nivel umbral de dosis ponderada según EBR comprometida en el tejido  $T^{14}$  por exposición interna para la aparición de efectos deterministas graves en la salud (Gy-Eq), y se indica en el Cuadro 9;

$AF_{T,III}(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis ponderada según EBR comprometida para la exposición interna del tejido T debida a una incorporación por inhalación, ((Gy-Eq)/Bq), y figura en el Cuadro 18; y

$F_{III}$  es la fracción de incorporación respirable para el Escenario III mostrada en el Cuadro 11.

*Ingestión.* Se analizó la exposición de la médula roja (Tejido 2), el colon (Tejido 4) y la tiroides (Tejido 5) por ingestión. La actividad inicial  ${}^R A_{T,IV}$ , (Bq), que, según el enfoque riesgo, puede

<sup>14</sup> Se examina la exposición de la médula roja (Tejido 2), la región AI del tracto respiratorio (Tejido 3R), colon (Tejido 4) y la tiroides (Tejido 5).

originar efectos deterministas graves en la salud en el tejido T<sup>15</sup> con arreglo al Escenario IV, (ingestión) es la solución de la ecuación (21) para una dosis igual a TD<sub>T</sub>(Δ), y viene dada por:

$${}^R A_{T,IV} = \frac{1}{F_{IV} \times AF_{T,IV}(\Delta)} TD_T(\Delta), \quad (46)$$

donde:

TD<sub>T</sub>(Δ) es el nivel umbral de dosis ponderada según EBR comprometida, causada por exposición interna del tejido T<sup>15</sup>, (Gy-Eq), y figura en el Cuadro 9;

AF<sub>T,IV</sub>(Δ) es el factor de conversión de dosis ponderada según EBR comprometida para la exposición interna del tejido T debida a una incorporación por ingestión, ((Gy-Eq)/Bq), y se indica en el Cuadro 19; y

F<sub>IV</sub> es la fracción de incorporación por ingestión para el Escenario IV, y se muestra en el Cuadro 11.

*Contaminación de la piel.* La actividad inicial  ${}^R A_{6R,V}$ , (Bq), que, según el enfoque riesgo, puede originar efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 6R (dermis) conforme al Escenario V (contaminación de la piel), es la solución de la ecuación (23) para una dosis igual a TD<sub>6R</sub>, y viene dada por:

$${}^R A_{6R,V} = \frac{S_V}{F_V \times R_V \times T_V \times AF_{6R,V}} TD_{6R}, \quad (47)$$

donde:

TD<sub>6R</sub> es el nivel umbral de dosis ponderada según EBR en la dermis para la aparición de efectos deterministas graves en la salud (Gy-Eq), y se muestra en el Cuadro 8;

AF<sub>6R,V</sub> es el factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR para la exposición por contacto de la dermis debida a contaminación superficial, ((Gy-Eq)/(s×Bq/cm<sup>2</sup>)), y se indica en el Cuadro 19;

F<sub>V</sub> es la fracción de material radiactivo dispersado en el Escenario V, y figura en el Cuadro 11;

S<sub>V</sub> es el área de la superficie afectada por contaminación primaria en el Escenario V (cm<sup>2</sup>), y se muestra en el Cuadro 11;

R<sub>V</sub> es la razón entre la contaminación en la piel y la contaminación superficial según el Escenario V, y se muestra en el Cuadro 11; y

T<sub>V</sub> es la duración de la exposición para el Escenario V, (s), y se indica en el Cuadro 11.

*Inmersión.* La actividad de un gas noble radiactivo  ${}^R A_{7,VI}$ , (Bq), que, según el enfoque riesgo, puede originar efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 7 (torso) conforme al Escenario VI (inmersión) es la solución de la ecuación (25) para una dosis igual a TD<sub>7</sub>, y viene dada por:

$${}^R A_{7,VI} = \frac{V_{VI}}{T_{VI} \times AF_{2,VI}} TD_7, \quad (48)$$

---

<sup>15</sup> Se analiza la irradiación de la médula roja (Tejido 2), el colon (Tejido 4) y la tiroides (Tejido 5).

donde:

$TD_7$  es el nivel umbral de dosis ponderada según EBR en el torso para la aparición de efectos deterministas graves en la salud (Gy-Eq), y se muestra en el Cuadro 8;

$AF_{2,VI}$  es el factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR para exposición externa de la médula roja<sup>16</sup> debida a la inmersión en un gas noble radiactivo,  $((Gy-Eq)/(Bq \times s/m^3))$ , y figura en el Cuadro 20;

$V_{VI}$  es el volumen de la habitación del Escenario VI, ( $m^3$ ), y se indica en el Cuadro 11;

$T_{VI}$  es la duración de la exposición en el Escenario VI, (s), y se presenta en el Cuadro 11; y

$F_{VI}$  es la fracción de material liberado en la habitación, y se muestra en el Cuadro 11.

*Establecimiento del valor  ${}^R D_2$ .* Los valores  ${}^R D_2$  se calcularon para los gases nobles radiactivos de manera diferente que para los otros radionucleidos.

En el caso de materiales que no sean gases nobles, el valor  ${}^R D_2$ , (Bq), es el mínimo de las actividades iniciales  ${}^R A_{III,R}$ ,  ${}^R A_{IV}$ ,  ${}^R A_V$  y  $A_C$ , y viene dado por:

$${}^R D_2 = \min\{{}^R A_{III,R}, {}^R A_{IV}, {}^R A_V, A_C\}, \quad (49)$$

donde:

$A_C$  es la actividad correspondiente límite de criticidad de masa, (Bq), y se indica en el Cuadro 28; y

${}^R A_{III,R}$ ,  ${}^R A_{IV}$ , y  ${}^R A_V$  son las actividades iniciales mínimas previa consideración de la masa, (Bq), definidas en las ecuaciones (50), (51) y (52):

$${}^R A_{III,R} = \begin{cases} \min\{{}^R A_{2,III,R}, {}^R A_{3R,III,R}, {}^R A_{4,III,R}, {}^R A_{5,III,R}\} & \text{if } M \leq M_{III} \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_{III} \end{cases}, \quad (50)$$

donde:

${}^R A_{T,III,R}$  son las actividades iniciales dadas por la ecuación (45), (Bq);

$M$  es la masa<sup>9</sup> (g) del material radiactivo cuya actividad es igual a  $\min\{{}^R A_{2,III,R}, {}^R A_{3R,III,R}, {}^R A_{4,III,R}, {}^R A_{5,III,R}\}$ ; y

$M_{III}$  es el límite de masa (g) para el Escenario III mostrado en el Cuadro 11.

$${}^R A_{IV} = \begin{cases} \min\{{}^R A_{2,IV}, {}^R A_{4,IV}, {}^R A_{5,IV}\} & \text{if } M \leq M_{IV} \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_{IV} \end{cases}, \quad (51)$$

donde:

${}^R A_{T,IV}$  son las actividades iniciales dadas por la ecuación (46), (Bq);

---

<sup>16</sup> Para simplificar se supone que la dosis a la médula ósea roja puede utilizarse como valor aproximado de la dosis a todos los órganos del torso.

$M$  es la masa<sup>9</sup> (g) del material radiactivo cuya actividad es igual a  $\min\{^R A_{2,IV}, ^R A_{4,IV}, ^R A_{5,IV}\}$ ; y

$M_{IV}$  es el límite de masa (g) para el Escenario IV;

$$^R A_V = \begin{cases} ^R A_{6R,V} & \text{if } M \leq M_V \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_V \end{cases}, \quad (52)$$

donde:

$^R A_{6R,V}$  es la actividad inicial dada por la ecuación (47), (Bq);

$M$  es la masa<sup>9</sup> (g) del material radiactivo cuya actividad es  $^R A_{6R,V}$ ; y

$M_V$  es el límite de masa (g) para el Escenario V indicado en el Cuadro 8.

Para los gases nobles el valor  $^R D_2$ , (Bq), es la mínima de las actividades  $A_C$  y  $^R A_{VI}$  y viene dado por:

$$^R D_2 = \min\{^R A_{VI}, A_C\}, \quad (53)$$

donde:

$A_C$  es el límite de criticidad de masa, (Bq), y figura en el Cuadro 28;

$^R A_{VI}$  es la actividad inicial dada por la ecuación (54), (Bq):

$$^R A_{VI} = \begin{cases} ^R A_{7,VI} & \text{if } M \leq M_{VI} \\ \text{Unlimited} & \text{if } M > M_{VI} \end{cases}, \quad (54)$$

donde:

$^R A_{7,VI}$  es la actividad inicial dada por la ecuación (48), (Bq);

$M$  es la masa<sup>9</sup> (g) de material radiactivo cuya actividad es  $^R A_{7,VI}$  (g); y

$M_{VI}$  es el límite de masa para el Escenario VI mostrado en el Cuadro 11 (g).

El valor  $^R D_2$  para un determinado material radiactivo distinto de un gas noble es ilimitado si los valores de  $^R A_{III}$ ,  $^R A_{IV}$ ,  $^R A_V$  y  $A_C$  lo son. Es ilimitado en el caso de un gas noble radiactivo si los valores de  $^R A_{VI}$  y  $A_C$  para ese radionucleido lo son. Los valores  $^R D_2$  se enumeran en los Cuadros 1 y 24 (para los radionucleidos a los que también se aplicó el enfoque experto).

## APÉNDICE IV FACTORES DE CONVERSIÓN DE TASA DE DOSIS EXTERNA

En este apéndice se explica con detalle el cálculo de los factores de conversión de tasa de dosis para caracterizar las fuentes de una exposición externa con arreglo a los Escenarios I y II. Se utilizaron dos tipos de factores de conversión en los enfoques experto y riesgo para calcular los valores  $D_1$ :

- a) factores de conversión de tasa de dosis que caracterizan las fuentes emisoras de radiación de baja TLE exclusivamente; y
- b) factores de conversión de tasa de dosis que caracterizan las fuentes emisoras de radiación mixta de alta y de baja TLE.

Los factores de conversión de tasa de dosis para emisores de baja TLE utilizados en los enfoques experto y riesgo se enumeran en el Cuadro 15, y los factores de conversión de tasa de dosis empleados para la radiación de alta TLE se enumeran en los Cuadros 14 y 13. Estos factores dependen del escenario de exposición y de las energías e intensidades de las radiaciones emitidas por la fuente. Esto último depende de las emisiones procedentes del radionucleido encapsulado en la fuente, así como de las interacciones de esta radiación primaria con el material de la fuente. Las energías e intensidades de las radiaciones emitidas por los radionucleidos se tomaron de la Publicación 38 de la CIPR [38]. El efecto del aumento interno de la progenie en las características dosimétricas de una fuente se tuvo en cuenta como se indica en el Apéndice VIII.

Se supuso que la fuente estaba formada por material radiactivo distribuido uniformemente y encapsulado en acero inoxidable. Dado que la fuente está encapsulada, las partículas alfa y los electrones emitidos (electrones beta y de conversión) no salen de ella. Las partículas beta y los electrones de conversión, sin embargo, originan una radiación de frenado al ser desacelerados dentro del material de la fuente y del acero inoxidable. La producción de radiación de frenado en el material de la fuente se tuvo en cuenta en el caso de los emisores beta. También se tuvo en cuenta la autoabsorción dentro de la fuente. En los valores de los factores de conversión de dosis para los emisores beta se incluyó la radiación de frenado estimada, así como la emisión gamma.

La geometría de la fuente encapsulada se supuso igual a la de un cilindro recto de 0.5 cm de diámetro y 1.5 cm de longitud. La geometría de la exposición externa del cuerpo humano a la fuente no dispersada se definió mediante el escenario de exposición que se estaba evaluando:

- a) En el escenario I (escenario “bolsillo”) se calcula la dosis en el tejido blanco, que es de aproximadamente 63 g en la línea central; se supone que la longitud de la fuente es la de un cilindro de 10 cm de radio y 0.2 cm de altura centrado en la fuente externa, la cual se sitúa 2 cm por encima. La cara circular del cilindro es paralela a la longitud de la fuente. De esta manera se obtiene un valor aproximado al de la dosis causada por una fuente en movimiento transportada por una persona durante varias horas, como se analiza en el Apéndice II.
- b) En el escenario II (escenario “habitación”) se trata la exposición de un hombre de referencia adulto a una fuente pequeña, encapsulada, isotrópica y sin blindaje, perpendicular al centro del torso y situada a una distancia de 1 m. El material entre la fuente y el torso es aire con una densidad de  $1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ .

## IV.1. Radiación de baja TLE

### IV.1.1. Factores de dosis utilizados en el enfoque experto

Los factores de dosis que caracterizan la exposición externa a fuentes de radiación de baja TLE<sup>17</sup> son en particular:

- los fotones originados por la transformación nuclear de un radionucleido contenido en la fuente; y
- los fotones de radiación de frenado originados por las interacciones de partículas beta y el material de la fuente.

Los factores de conversión de dosis específicos de los radionucleidos.

- $DF_{1,I}^L$ , que es la tasa de dosis para la dosis absorbida en tejido blando según el escenario bolsillo, (Escenario I) (Gy/(Bqxs)); y
- $DF_{2,II}^L$ , que representa la tasa de dosis absorbida en la médula roja correspondiente a una fuente de radiación de baja TLE situada a un metro del cuerpo (Escenario II),

vienen dados por:

$$DF_{T,S}^L = \sum_i^n Y_i^\gamma d_{T,S}^\gamma(E_{\gamma,i}) + \sum_j^m Y_j^e \int_{E_0}^{E_{e,j}} S(E_\gamma, E_{e,j}) d_{T,S}^\gamma(E_\gamma) dE_\gamma + \int_{E_0}^{E_e^0} S_\beta(E_\gamma, E_e^0) d_{T,S}^\gamma(E_\gamma) dE_\gamma, \quad (55)$$

donde:

$DF_{T,S}^L$  es el factor de conversión de dosis para la dosis absorbida en el órgano o tejido T, irradiado por una radiación de baja TLE procedente de una fuente como la descrita en el escenario S, (Gy/(Bqxs));

$d_{T,S}^\gamma(E_\gamma)$  es un coeficiente de dosis absorbida igual a la dosis absorbida en el órgano o tejido T, que es irradiado por un fotón emitido por de una fuente monoenergética con una energía  $E_\gamma$  como se describe en el escenario S, (Gy/(Bqxs)).

Los tres términos de la ecuación (55) son, respectivamente:

- la contribución de los fotones discretos de energía  $E_{\gamma,i}$  e intensidad  $Y_i^\gamma$  por transformación nuclear;
- la contribución del espectro continuo de radiación de frenado  $S(E_\gamma, E_{e,j})$  resultante de la desaceleración de cada electrón de conversión de rendimiento  $Y_j^e$  y energía cinética  $E_{e,j}$ ; y
- la contribución del espectro continuo de radiación de frenado  $S_\beta(E_\gamma, E_e^0)$  resultante de un espectro beta con una energía máxima  $E_e^0$ .

---

<sup>17</sup> Material informativo elaborado por K.F. Eckerman del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, Oak Ridge, TN, EE.UU.

El límite inferior de las integrales del segundo y tercer términos,  $E_0$ , es 10 keV.

El tratamiento de la producción de radiación de frenado para deducir los valores D se basó en el trabajo de Dillman y Eckerman [39], como se señala en el Apéndice C de Federal Guidance Report N° 12 [40].  $S(E_\gamma, E_e) dE_\gamma$  se define como el número de fotones de radiación de frenado con una energía comprendida entre  $E_\gamma$  y  $E_\gamma + dE_\gamma$  resultantes de un electrón monoenergético de energía cinética inicial  $E_e$ . El espectro de radiación de frenado normalizado  $S'(E_\gamma, E_e)$  se define entonces como:

$$S'(E_\gamma, E_e) = 100 \frac{E_\gamma}{E_e} S(E_\gamma, E_e) \text{ siendo } 0 \leq E_\gamma \leq E_e, \quad (56)$$

y se expresa en (%). Se tabula en la Ref. [39] para materiales de diferente poder de frenado. El rendimiento de radiación de frenado, el porcentaje de energía de los electrones convertida en radiación de frenado,  $Y_{BS}$ , es:

$$Y_{BS}(E_e) = \int_0^{E_e} S'(E_\gamma, E_e) dE_\gamma. \quad (57)$$

El espectro de radiación de frenado normalizado  $S'(E_\gamma, E_e)$  y el rendimiento de radiación de frenado para el acero inoxidable ( $Z \approx 26$ ) se indican en el Cuadro 12.

Si se considera un espectro beta de energía máxima  $E_e^0$ , y  $n_\beta(E_e, E_e^0) dE_e$  es el número de partículas beta de energía comprendida entre  $E_e$  y  $E_e + dE_e$ , el espectro de radiación de frenado resultante es:

$$S_\beta(E_\gamma, E_e^0) = \frac{1}{100 E_\gamma} \int_{E_\gamma}^{E_e^0} n_\beta(E_e, E_e^0) S'(E_\gamma, E_e) E_e dE_e \quad (58)$$

CUADRO 12. ESPECTROS DE RADIACIÓN DE FRENADO NORMALIZADOS PRODUCIDOS POR ELECTRONES EN ACERO INOXIDABLE

| $E_e$<br>(MeV) | $E_\gamma/E_e$ |      |      |      |      |      |       |
|----------------|----------------|------|------|------|------|------|-------|
|                | 0              | 0.05 | 0.10 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50  |
| 0.001          | 17.7           | 14.5 | 12.4 | 9.93 | 8.30 | 6.97 | 5.76  |
| 0.0025         | 11.0           | 9.67 | 8.78 | 7.69 | 6.71 | 5.75 | 4.79  |
| 0.005          | 9.28           | 8.77 | 8.29 | 7.38 | 6.44 | 5.49 | 4.55  |
| 0.01           | 9.05           | 8.72 | 8.31 | 7.32 | 6.28 | 5.26 | 4.29  |
| 0.025          | 9.28           | 8.87 | 8.32 | 7.04 | 5.86 | 4.78 | 3.82  |
| 0.05           | 9.75           | 8.84 | 7.97 | 6.44 | 5.18 | 4.13 | 3.23  |
| 0.075          | 9.66           | 8.63 | 7.67 | 6.01 | 4.73 | 3.71 | 2.86  |
| 0.1            | 9.66           | 8.46 | 7.39 | 5.67 | 4.40 | 3.40 | 2.59  |
| 0.2            | 9.49           | 7.88 | 6.62 | 4.81 | 3.58 | 2.65 | 1.94  |
| 0.3            | 9.30           | 7.45 | 6.11 | 4.30 | 3.11 | 2.25 | 1.61  |
| 0.4            | 9.11           | 7.13 | 5.74 | 3.95 | 2.80 | 1.99 | 1.40  |
| 0.5            | 8.87           | 6.87 | 5.47 | 3.70 | 2.59 | 1.82 | 1.27  |
| 0.6            | 8.72           | 6.66 | 5.25 | 3.52 | 2.44 | 1.70 | 1.17  |
| 0.8            | 8.47           | 6.35 | 4.95 | 3.26 | 2.24 | 1.54 | 1.06  |
| 1              | 8.26           | 6.13 | 4.75 | 3.10 | 2.12 | 1.46 | 0.992 |
| 1.2            | 8.09           | 5.96 | 4.60 | 3.00 | 2.04 | 1.40 | 0.955 |
| 1.4            | 7.92           | 5.82 | 4.49 | 2.92 | 1.98 | 1.37 | 0.933 |
| 1.6            | 7.77           | 5.71 | 4.40 | 2.86 | 1.95 | 1.35 | 0.920 |
| 1.8            | 7.64           | 5.62 | 4.33 | 2.81 | 1.93 | 1.33 | 0.913 |
| 2              | 7.56           | 5.55 | 4.27 | 2.78 | 1.91 | 1.33 | 0.910 |
| 2.5            | 7.34           | 5.39 | 4.15 | 2.73 | 1.88 | 1.32 | 0.908 |
| 3              | 7.13           | 5.24 | 4.06 | 2.69 | 1.87 | 1.31 | 0.911 |
| 4              | 6.72           | 5.02 | 3.93 | 2.63 | 1.85 | 1.31 | 0.920 |
| 5              | 6.38           | 4.84 | 3.82 | 2.59 | 1.84 | 1.31 | 0.928 |
| 6              | 6.10           | 4.69 | 3.74 | 2.56 | 1.82 | 1.31 | 0.934 |
| 8              | 5.66           | 4.44 | 3.58 | 2.49 | 1.79 | 1.31 | 0.938 |
| 10             | 5.35           | 4.24 | 3.44 | 2.41 | 1.76 | 1.29 | 0.934 |

| $E_e$<br>(MeV) | $E_\gamma/E_e$ |       |       |       |       | Rendi-<br>miento<br>(%) |
|----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|
|                | 0.60           | 0.70  | 0.80  | 0.90  | 0.95  |                         |
| 0.001          | 4.57           | 3.41  | 2.27  | 1.13  | 0.567 | 0.0063                  |
| 0.0025         | 3.84           | 2.88  | 1.93  | 0.968 | 0.484 | 0.0122                  |
| 0.005          | 3.61           | 2.69  | 1.78  | 0.883 | 0.439 | 0.0229                  |
| 0.01           | 3.36           | 2.47  | 1.61  | 0.793 | 0.393 | 0.0443                  |
| 0.025          | 2.93           | 2.11  | 1.35  | 0.652 | 0.319 | 0.104                   |
| 0.05           | 2.43           | 1.73  | 1.09  | 0.520 | 0.254 | 0.188                   |
| 0.075          | 2.13           | 1.49  | 0.933 | 0.439 | 0.213 | 0.260                   |
| 0.1            | 1.90           | 1.32  | 0.815 | 0.380 | 0.184 | 0.325                   |
| 0.2            | 1.37           | 0.921 | 0.550 | 0.248 | 0.118 | 0.543                   |
| 0.3            | 1.11           | 0.724 | 0.422 | 0.185 | 0.087 | 0.724                   |
| 0.4            | 0.952          | 0.611 | 0.349 | 0.150 | 0.069 | 0.885                   |
| 0.5            | 0.851          | 0.538 | 0.303 | 0.128 | 0.059 | 1.03                    |
| 0.6            | 0.782          | 0.490 | 0.274 | 0.114 | 0.052 | 1.18                    |

| $E_e$<br>(MeV) | $E_\gamma/E_e$ |       |       |       |       | Rendi-<br>miento |
|----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|------------------|
|                | 0.60           | 0.70  | 0.80  | 0.90  | 0.95  | (%)              |
| 0.8            | 0.698          | 0.433 | 0.239 | 0.097 | 0.044 | 1.47             |
| 1              | 0.653          | 0.404 | 0.221 | 0.089 | 0.039 | 1.75             |
| 1.2            | 0.628          | 0.388 | 0.211 | 0.084 | 0.037 | 2.03             |
| 1.4            | 0.615          | 0.379 | 0.206 | 0.081 | 0.035 | 2.31             |
| 1.6            | 0.608          | 0.375 | 0.203 | 0.079 | 0.034 | 2.59             |
| 1.8            | 0.604          | 0.373 | 0.201 | 0.078 | 0.033 | 2.88             |
| 2              | 0.603          | 0.373 | 0.201 | 0.077 | 0.032 | 3.17             |
| 2.5            | 0.605          | 0.375 | 0.201 | 0.076 | 0.031 | 3.88             |
| 3              | 0.609          | 0.379 | 0.202 | 0.075 | 0.030 | 4.59             |
| 4              | 0.620          | 0.387 | 0.207 | 0.076 | 0.030 | 5.98             |
| 5              | 0.630          | 0.395 | 0.212 | 0.077 | 0.031 | 7.35             |
| 6              | 0.638          | 0.402 | 0.216 | 0.078 | 0.031 | 8.68             |
| 8              | 0.647          | 0.411 | 0.220 | 0.080 | 0.031 | 11.3             |
| 10             | 0.648          | 0.414 | 0.223 | 0.081 | 0.032 | 13.7             |

Para calcular los factores de dosis relativos al Escenario I, se computó el coeficiente de dosis absorbida,  $d_{1,I}^\gamma(E_\gamma)$ , debida a los fotones emitidos dentro de la fuente como promedio en los tejidos comprendidos en un cilindro de 10 cm de radio y 0.2 cm de altura. Se procedió así con el fin de obtener una aproximación de la dosis causada por una fuente que se mueve, transportada en un bolsillo. Estos cálculos se realizaron mediante el código MCNP en el que se supone una capa de tejido blando de la composición especificada en la Publicación 44 de la CIUMR [41]. Los coeficientes de dosis absorbida en profundidad como función de la energía de los fotones emitidos se muestran en la Figura 6 (curva continua). Algunos de los datos situados por debajo de 30 keV se basaron en extrapolaciones de energías superiores siempre que los resultados del método Monte Carlo se consideraron poco fiables a energías tan bajas.

Para calcular los factores de dosis del Escenario II, se computó el coeficiente de dosis absorbida,  $d_{2,II}^\gamma(E_\gamma)$ , debida a los fotones emitidos dentro de la fuente para la exposición de un hombre de referencia adulto a una pequeña fuente encapsulada, isotrópica y sin blindaje, perpendicular al centro del torso y a una distancia de 1 m. El material entre la fuente y el torso es aire con una densidad de  $1.2 \times 10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup>. Estos cálculos se realizaron mediante el código ALGAMP del Laboratorio Nacional de Oak Ridge (ORNL) [40] para una fuente puntual. La distribución de la energía y la intensidad de los fotones de la fuente puntual se basó en los cálculos según el código MCNP de la emisión producida por la fuente sin blindaje. El coeficiente de dosis absorbida en la médula roja como función de la energía de los fotones emitidos se muestra en la Figura 6 (curva discontinua). Algunos de los datos relativos a los fotones de energía inferior a 30 keV se basaron en una extrapolación de energías superiores siempre que los cálculos según el método de Monte Carlo se consideraron poco fiables a energías tan bajas.

El recorrido libre medio<sup>18</sup> de los fotones en aire es aproximadamente de 50 m en el caso de fotones con una energía de 10 keV, y de 400 m en el de fotones con una energía de 1 MeV [42]. Por consiguiente, la dispersión múltiple de fotones en el aire durante su trayectoria desde la fuente a la superficie del cuerpo humano (el efecto de brillo celeste) es despreciable y no se trató. Como se muestra en la Publicación 74 de la CIPR [43], la dosis absorbida promedio de radiación de baja TLE en la médula roja no difiere significativamente de la recibida por cualquier otro órgano considerado

<sup>18</sup> El recorrido libre medio es la distancia promedio que recorre una partícula o fotón entre dos interacciones consecutivas en un medio dado.

como parte del torso. Por tanto, en los cálculos de la dosis al “torso” se utilizaron los factores de conversión de tasa de dosis aplicados a la médula roja ósea.

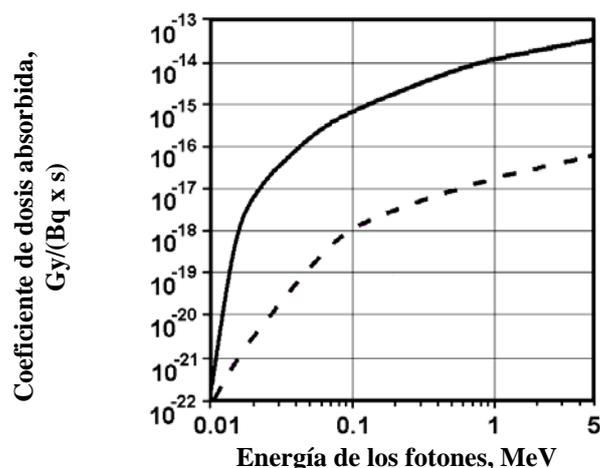


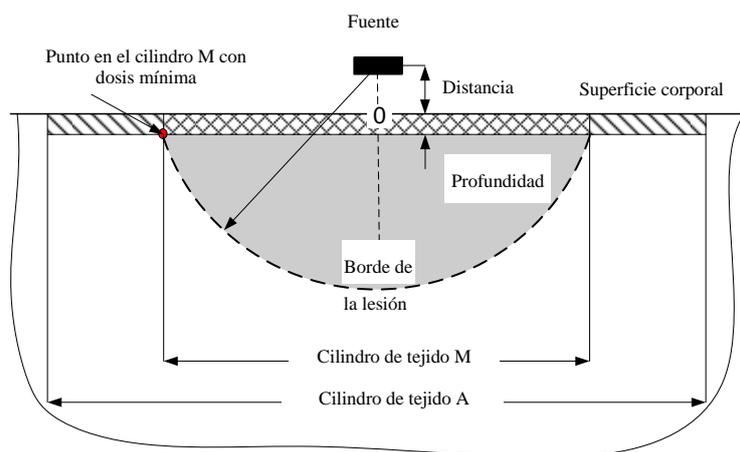
FIG. 6. Coeficientes de dosis absorbida causada por los fotones emitidos dentro de la fuente encapsulada. La curva continua indica la dosis en tejido blando para el Escenario I. La curva discontinua indica la dosis en la médula roja para el Escenario II.

#### IV.1.2. Factores de dosis utilizados en el enfoque riesgo

Como parte del enfoque riesgo, se realizaron cálculos independientes para verificar que los factores de conversión de tasa de dosis aplicables a la exposición a una fuente adyacente (Escenario I) eran razonables. Estos cálculos independientes se realizaron para una fuente adyacente emisora de fotones de energía superior a 50 keV. En este caso, los factores de conversión de tasa de dosis se calcularon como el producto de la constante de kerma de los fotones de determinada energía y el factor geométrico [44]. La constante de kerma en aire de un radionucleido se calculó mediante el código "RadSum 32 Code: A Win 32 version" [45]. El factor geométrico utilizado se basó en los datos empleados en el enfoque experto descrito anteriormente.

Los cálculos mostraron que en el caso de los fotones de energía superior a 50 keV los factores de conversión de la tasa de dosis determinados para las siguientes geometrías eran iguales con una incertidumbre aproximada del 2%:

- La tasa de dosis es el promedio en un cilindro de 10 cm de radio y 0.2 cm de altura; (esta es la base para el cálculo del factor de conversión de tasa de dosis utilizado en el enfoque experto);
- La tasa de dosis es el promedio en el cilindro A (mostrado en la Figura 7) cuyo radio mide 10 cm (área de  $314 \text{ cm}^2$ ) y su altura 0.5 cm; y
- La tasa de dosis es la tasa de dosis mínima en el cilindro M (Figura 7) que tiene un área de  $100 \text{ cm}^2$  (radio de 6 cm aproximadamente) y una profundidad de 0.5 cm.



*FIG. 7. Geometrías para la verificación del factor de dosis de fuente adyacente.*

En los casos b) y c) la fuente está centrada sobre el cilindro a una distancia de 1.5 cm sobre la cara del mismo y la dosis se estima a partir de una profundidad de 0.5 cm bajo la superficie. Una dosis que exceda el umbral de necrosis provoca una lesión en el tejido blando. En la Fig. 7 el borde de la lesión debida a la fuente adyacente se representa como una superficie semiesférica en la que la dosis es igual al umbral de necrosis del tejido blando ( $TD_1$ ), indicado en el Cuadro 8 e igual a 25 Gy-Eq. La irradiación del tejido blando por esa fuente es heterogénea. La Fig. 8 muestra la transformación del valor de dosis aproximado dentro de un cilindro de tejido análogo al cilindro A. Ello es válido para un emisor gamma de actividad igual al valor de  $A_{1,I}$  dado por la ecuación (46) para el Escenario I de exposición. La dosis es máxima en el centro del cilindro de tejido irradiado justo bajo la fuente y disminuye rápidamente conforme se aleja del centro. La Fig. 9 muestra la dosis promedio en un área circular aproximada desde la fuente adyacente, de actividad igual a  $A_{1,I}$ , como función del radio del área. La Fig. 10 muestra el área del cilindro A donde la dosis causada por la fuente sobrepasaría los 25 Gy. Esto demuestra que el área donde la dosis supera 25 Gy parece concordar satisfactoriamente con la experiencia sobre la formación de necrosis resultante de las emergencias en las que hubo fuentes transportadas en bolsillos.

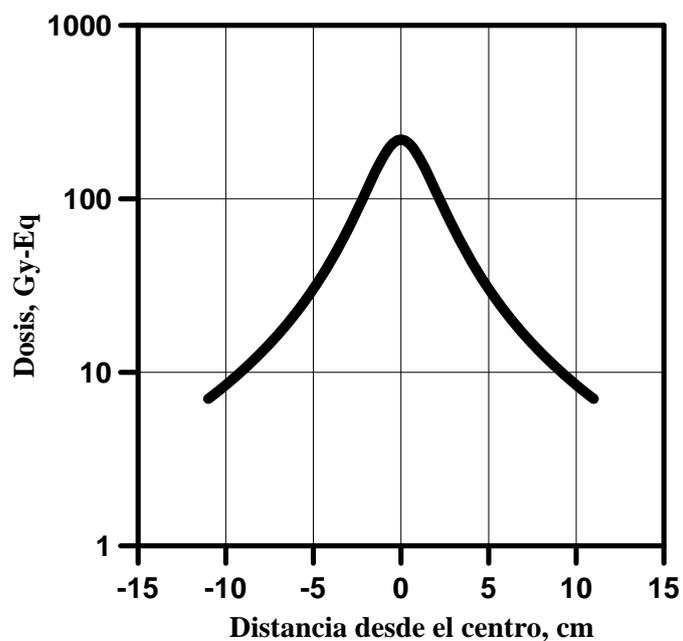


FIG. 8. Dosis aproximada para una fuente de actividad  $A_{1,1}$  a una distancia dada desde la normal a una fuente situada 2 cm por encima de la base del cilindro de tejido (a 1.5 cm sobre la superficie corporal).

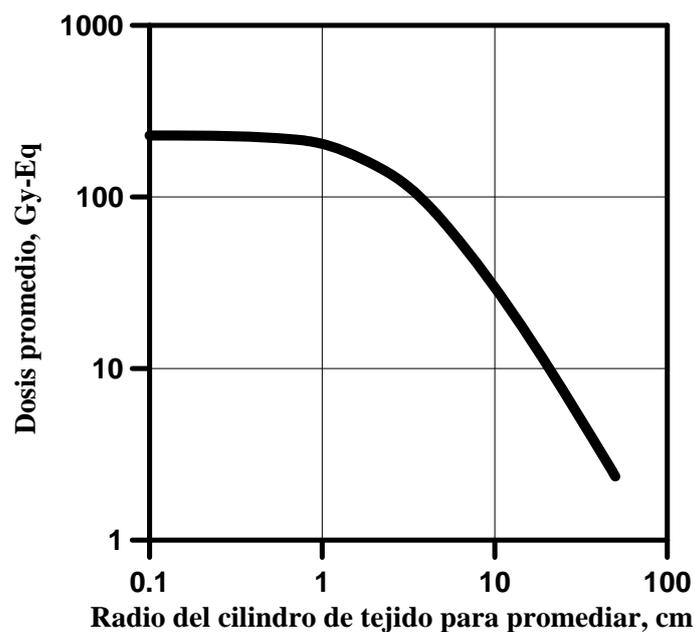


FIG. 9. Dosis promedio en un área circular aproximada, debida a la fuente descrita en la FIG.8, como función del radio del área.

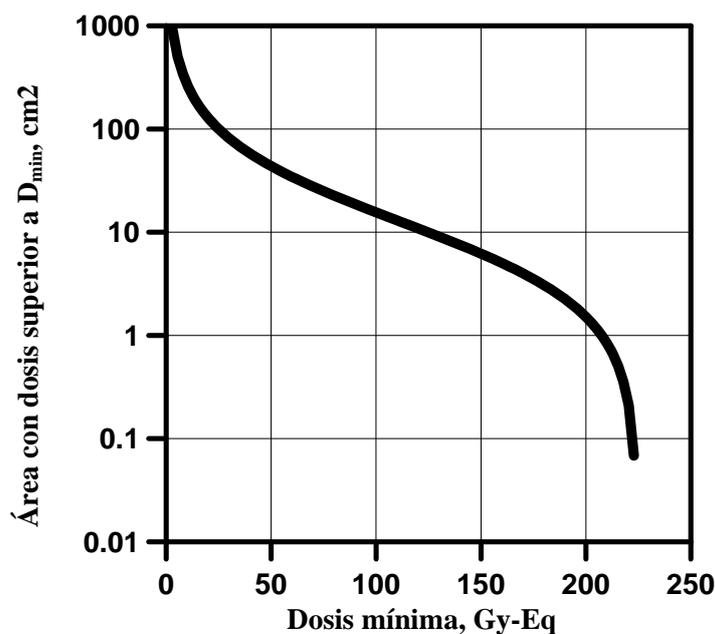


FIG. 10. Área aproximada donde la dosis excedería 25 Gy-Eq para una fuente situada a 2 cm sobre la base del cilindro de tejido (a 1.5 cm sobre la superficie corporal).

Los factores de conversión de dosis,  $AF_{1,I}$ , para la irradiación de tejido blando debida a una fuente adyacente (Escenario I) vienen dados por:

$$AF_{1,I} = RBE^L \times DF_{1,I}^L, \quad (59)$$

donde:

$AF_{1,I}$  es el factor de conversión de dosis para la dosis ponderada según EBR en tejido blando irradiado por una fuente adyacente, como se describe en el Escenario I, ((Gy-Eq)/(Bq×s));

$RBE^L$  representa la eficacia biológica relativa (EBR) de radiación de baja TLE y es igual a la unidad ((Gy-Eq)/Gy); y

$DF_{1,I}^L$  es el factor de conversión de dosis para la dosis absorbida en tejido blando irradiado por una radiación de baja TLE debida a una fuente adyacente, como se describe en el Escenario I, (Gy/(Bq×s)).

Los factores de conversión de dosis,  $AF_{1,I}$ , para la irradiación de la médula roja por una fuente distante (Escenario II) vienen dados por:

$$AF_{2,II} = RBE^L \times DF_{2,II}^L, \quad (60)$$

donde:

$AF_{2,II}$  es el factor de conversión de dosis para la dosis ponderada según EBR en médula roja irradiada por una fuente distante, como se describe en el Escenario II, ((Gy-Eq)/(Bq×s));

$RBE^L$  representa la eficacia biológica relativa (EBR) de radiación de baja TLE y es igual a la unidad ((Gy-Eq)/Gy);

$DF_{2,II}^L$  es el factor de conversión de dosis para la dosis absorbida en médula roja irradiada por una radiación de baja TLE debida a una fuente distante, como se describe en el Escenario I, (Gy/(Bq×s)).

La EBR de una radiación de baja TLE es igual a la unidad, como se indica en el Cuadro 10. Por tanto, el factor de conversión de tasa de dosis para una dosis ponderada según EBR en el caso de una fuente emisora exclusivamente de radiación de baja TLE es numéricamente igual al correspondiente factor de conversión de tasa de dosis absorbida.

## IV.2. RADIACIÓN DE ALTA TLE

En el caso de exposición externa, la única radiación de alta TLE que interesa son los neutrones. Había varias fuentes de neutrones significativas que debían evaluarse por ser potencialmente peligrosas. Las características nucleares de algunas fuentes comunes de neutrones se enumeran en el Cuadro 27. Las que contienen  $^{252}\text{Cf}$  y mezclas sólidas de  $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$  o  $^{239}\text{Pu}/^9\text{Be}$  son las más importantes. Las fuentes de neutrones emiten también fotones; por consiguiente la tasa de dosis de una fuente de tal tipo debe incluir esta radiación de baja TLE originada por desintegración nuclear o fisión espontánea, así como la radiación de neutrones de alta TLE.

### IV.2.1. Factores de dosis utilizados en el enfoque experto

En el caso de fuentes de neutrones de  $^{252}\text{Cf}$ , los factores de conversión de tasa de dosis absorbida se estimaron utilizando la tasa de dosis efectiva de la Ref. [46]. La tasa de dosis efectiva causada por los neutrones se dividió por 10 para estimar el factor de tasa de dosis absorbida aplicable a la radiación de alta TLE<sup>19</sup>,  $DF_{2,II}^{H+L}$ , en la médula roja a una distancia de 1 m de la fuente (Escenario II). El factor de tasa de dosis absorbida,  $DF_{1,I}^{H+L}$ , aplicable al tejido blando según el escenario bolsillo (Escenario I) se supuso 1000 veces superior al valor de  $DF_{2,II}^{H+L}$ .

En el caso de las fuentes de neutrones de  $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$  y  $^{239}\text{Pu}/^9\text{Be}$ , los factores de conversión de tasa de dosis absorbida se estimaron utilizando la tasa de equivalente de dosis de la Ref. [47]. Esta referencia presenta en el Cuadro 3.1 una fórmula de la tasa de equivalente de dosis debida a una fuente isotópica puntual (point isotopic source) de neutrones con una energía de 2 MeV. Este valor es igual a la energía promedio de los neutrones emitidos por una fuente no blindada de  $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$  o  $^{239}\text{Pu}/^9\text{Be}$ :

$$h_{\text{point}}^n(r) \approx 4.2 \times 10^{-10} \frac{Y_n}{4\pi r^2}, \quad (61)$$

donde:

$h_{\text{point}}^n(r)$  es el coeficiente de tasa de equivalente de dosis a 1 cm de una fuente de neutrones isotrópica puntual con una energía de 2 MeV, (Sv/(Bq×s));

r es la distancia desde la fuente puntual, (cm); e

$Y_n$  es un rendimiento de neutrones de la fuente, el número de neutrones emitidos en 1 s por una fuente de una unidad de actividad de un radionucleido emisor alfa, (neutrones/(Bq×s)).

La Referencia [47] presenta en el Cuadro 7.5 unos rendimientos similares de  $6 \times 10^{-5}$  neutrón/(Bq×s) aproximadamente tanto para las fuentes de neutrones de  $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$  como para las de  $^{239}\text{Pu}/^9\text{Be}$ <sup>20</sup>. A este rendimiento, la ecuación (61) da una tasa de equivalente de dosis de radiación de alta TLE a 2 cm

<sup>19</sup> La contribución de la radiación de baja TLE a la dosis efectiva causada por el  $^{252}\text{Cf}$  no sobrepasa el 6% [46].

<sup>20</sup> Se indica el mismo valor en el Cuadro 27.

de una fuente de  $4 \times 10^{-16}$  Sv/(Bqxs) aproximadamente. Si se añade este valor a la dosis por fotones de  $8.7 \times 10^{-17}$  Gy/(Bqxs) para la radiación de baja TLE emitida por desintegración alfa del  $^{241}\text{Am}$  del Cuadro 15, el equivalente de dosis total es de  $5 \times 10^{-16}$  Sv/(Bqxs) aproximadamente. El valor de  $DF_{1,I}^{H+L}$ , el factor de conversión de dosis para la exposición a una fuente adyacente como se define en el Escenario I, se consideró igual a dicho equivalente. También se supuso que el factor de conversión de dosis para una exposición debida a una fuente situada a 1 metro,  $DF_{2,II}^H$ , era 1/1000 de  $DF_{1,I}^{H+L}$ . Los valores de  $DF_{1,I}^{L+H}$  y  $DF_{2,II}^{L+H}$  para los emisores de neutrones considerados en el enfoque experto que se utilizan para evaluar los valores  $D_1$  se enumeran en el Cuadro 13. Estos valores son una estimación imprecisa de la dosis absorbida expresada en equivalente de dosis para los neutrones de 2 MeV. Por consiguiente, ello implicará una sobreestimación significativa de la dosis absorbida y, por tanto, del peligro de radiación externa a causa de estas fuentes, como se puede comprobar si se comparan con las dosis calculadas según el enfoque riesgo enumeradas en el Cuadro 14.

#### IV.2.2. Factores de dosis utilizados en el enfoque riesgo

El factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR para una fuente de neutrones se compone de dos factores de conversión de dosis parciales que corresponden a la radiación de baja TLE y a la de alta TLE:

$$AF_{T,S} = AF_{T,S}^L + AF_{T,S}^H, \quad (62)$$

donde:

$AF_{T,S}^L$  es el factor de conversión de tasa de dosis parcial correspondiente a los fotones originados por desintegración nuclear alfa o beta, fisión espontánea o la reacción  $(\alpha,n)$ , y es igual a la tasa de dosis ponderada según EBR originada según el escenario S en el tejido T por una fuente de neutrones con una actividad de 1 Bq,  $((Gy-Eq)/(Bqxs))$ ; y

$AF_{T,S}^H$  es el factor de conversión de tasa de dosis parcial aplicable a los neutrones y es igual a la tasa de dosis ponderada según EBR originada según el escenario S en el tejido T por una fuente de neutrones con una actividad de 1 Bq,  $((Gy-Eq)/(Bqxs))$ .

Los valores de los factores de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR utilizados en el enfoque riesgo para calcular los valores  $D_1$  en el caso de fuentes de neutrones (alta TLE) se enumeran en el Cuadro 14.

Los factores de conversión de tasa de dosis parciales para los fotones originados por desintegración nuclear alfa o beta, fisión espontánea o la reacción  $(\alpha,n)$ ,  $AF_{T,S}^L$ , se calcularon a partir de los datos nucleares básicos sobre la emisión de radiación de baja TLE por fuentes de neutrones, y se enumeran en el Cuadro 27. Las funciones de respuesta de dosis  $d_{1,I}^Y(E_\gamma)$  y  $d_{2,II}^Y(E_\gamma)$  que se utilizaron para calcular los factores de conversión de tasa de dosis aplicables a los radionucleidos emisores de radiación de baja TLE fueron los mismos que los usados en el enfoque experto, y son proporcionales a la energía de los fotones cuando éstos sobrepasan los 0,1 MeV. El análisis de estas dependencias, basado en los valores de  $AF_{1,II}$  y  $AF_{7,II}$  calculados para fuentes de radionucleidos de fotones monoenergéticos como el  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{169}\text{Yb}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{174}\text{Lu}$ ,  $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{115m}\text{In}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{87m}\text{Sr}$ ,  $^{113m}\text{In}$ ,  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{135m}\text{Xe}$ ,  $^{74}\text{As}$ ,  $^{106}\text{Rh}$ ,  $^{132}\text{Cs}$ ,  $^{137+}\text{Cs}$ ,  $^{110}\text{Ag}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{86}\text{Rb}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{123}\text{Sn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{K}$  y  $^{42}\text{K}$ , indica que, para las funciones de respuesta de dosis ponderada según EBR, dichas dependencias son de la forma siguiente:

$$dA_{T,S}^Y(E_\gamma) \cong \alpha_{T,S}^Y \times Y_i^Y \times E_\gamma, \quad (63)$$

donde:

$dA_{T,S}^{\gamma}(E_{\gamma})$  es la función de respuesta de dosis ponderada según EBR igual a la dosis ponderada según EBR en el órgano o tejido T, irradiado por un fotón procedente de una fuente monoenergética con una energía  $E_{\gamma}$  como se describe en el escenario S, ((Gy-Eq)/(Bq×s));

$\alpha_{T,S}^{\gamma}$  es un factor de exposición específico del escenario y del órgano, ((Gy-Eq)/MeV);

$Y_i^{\gamma}$  es el rendimiento de fotones monoenergéticos de desintegración nuclear (fotón/(Bq×s)); y

$E_{\gamma}$  es la energía del fotón monoenergético originado en una transformación nuclear, (MeV/fotón).

Por consiguiente, los factores de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR parciales son iguales a:

$$AF_{T,S}^L = \alpha_{T,S}^{\gamma} \times \sum_i (Y_i^{\gamma} E_{\gamma,i}), \quad (64)$$

donde:

$AF_{T,S}^L$  es el factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR parcial para la radiación de baja TLE producida por fisión espontánea o por la reacción ( $\alpha,n$ ), y es igual a la tasa de dosis ponderada según EBR originada conforme al escenario S en el tejido T por una fuente de neutrones con una actividad<sup>21</sup> de 1 Bq, ((Gy-Eq)/(Bq×s)).

$\sum_i (Y_i^{\gamma} E_{\gamma,i})$  es el rendimiento<sup>21</sup> energético de los fotones procedentes de la fuente de neutrones, (MeV/(Bq×s)), y se indica en el Cuadro 27;

$\alpha_{T,S}^{\gamma}$  es un factor de exposición específico del escenario y del órgano igual a:

- $\alpha_{1,I}^{\gamma} = 9.6 \times 10^{-15}$  (Gy-Eq)/MeV para la exposición de tejido blando a una fuente adyacente; y
- $\alpha_{2,II}^{\gamma} = 1.4 \times 10^{-17}$  (Gy-Eq)/MeV para la exposición de la médula roja a una fuente distante.

El factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR parcial para la médula roja irradiada por neutrones originados por fisión espontánea o por la reacción ( $\alpha,n$ ) según el Escenario II,  $AF_{2,II}^H$ , se calculó a partir de los datos dosimétricos para la irradiación por neutrones de la médula roja con geometría rotativa (ROT) mostrados en el Cuadro A.31 de la Ref. [43]:

$$AF_{2,II}^H = \frac{Y^n(S_n)}{4\pi r_{II}^2} RBE_2^H \times \int_0^{\infty} S_n(E_n) \times d_{FG,ROT}^n(E_n) dE_n, \quad (65)$$

donde:

$AF_{2,II}^H$  es el factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR parcial para neutrones originados por fisión espontánea o por la reacción ( $\alpha,n$ ), causada según el Escenario II a la médula roja ((Gy-Eq)/(Bq×s));

---

<sup>21</sup> La actividad de las fuentes de neutrones en cuestión se expresa como el número de transformaciones alfa por segundo.

$S_n(E_n)dE_n$  es el espectro de los neutrones dado como la probabilidad de emisión de neutrones de energía comprendida entre  $E_n$  y  $E_n + dE_n$ , por la fuente de neutrones;

$d_{FG,ROT}^n(E_n)$  es el coeficiente de dosis absorbida igual a la dosis absorbida debida a la radiación de neutrones en la médula roja por unidad de fluencia de neutrones de energía  $E_n$  que inciden con una geometría rotativa (ROT) en el cuerpo del hombre de referencia, ( $Gy \times cm^2$ ), y se indica en el Cuadro A.31 de la Ref. [43]:

$$a) \quad \int_0^{\infty} S_n(E_n) \times d_{FG,ROT}^n(E_n) dE_n = 4.0 \times 10^{-11} \text{ Gy} \times \text{cm}^2 \text{ para el } ^{252}\text{Cf}; \text{ y}$$

$$b) \quad \int_0^{\infty} S_n(E_n) \times d_{FG,ROT}^n(E_n) dE_n = 4.3 \times 10^{-11} \text{ Gy} \times \text{cm}^2 \text{ para el } ^{241}\text{Am}/^9\text{Be}.$$

$RBE_2^H$  es la eficacia biológica relativa para el desarrollo de efectos deterministas graves en la médula roja originados por exposición externa a neutrones, y figura en el Cuadro 10;

$Y^n(S_n)$  es el rendimiento de neutrones<sup>21</sup> de una fuente de neutrones (neutrón/(Bq×s)), y se indica en el Cuadro 27; y

$r_{II}$  es la distancia entre la fuente de neutrones y el tejido blanco, (cm), definida en el Escenario II, y es igual a 100 cm.

Se utilizaron como  $S_n(E_n)$  los datos de los espectros no modificados de neutrones dados en la Ref. [48]:

- el espectro de neutrones producidos por fisión espontánea del  $^{252}\text{Cf}$  se tomó como referencia para todos los emisores de neutrones originados por fisión espontánea; y
- el espectro de neutrones emitidos por una fuente de  $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$  también se utilizó en el caso de una fuente de  $^{239}\text{Pu}/^9\text{Be}$ .

El factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR parcial para tejido blando irradiado por neutrones debidos a fisión espontánea o a la reacción ( $\alpha,n$ ) según el Escenario I,  $AF_{1,I}^H$ , se calculó a partir de  $AF_{2,II}^H$  considerando las geometrías de exposición del escenario bolsillo (Escenario I) y los factores de exposición  $\alpha_{T,S}^\gamma$  definidos para la ecuación (64), y es:

$$AF_{1,I}^H = \frac{\alpha_{1,I}^\gamma}{\alpha_{7,II}^\gamma} AF_{2,II}^H \cong 600 AF_{2,II}^H. \quad (66)$$

### IV.3. LISTA DE FACTORES DE CONVERSIÓN DE DOSIS EXTERNA

CUADRO 13. FACTORES DE CONVERSIÓN DE TASA DE DOSIS ABSORBIDA EN TEJIDO BLANDO Y MÉDULA ÓSEA PARA EMISORES DE ALTA TLE (NEUTRONES)

| Radionucleido                                   | Fuente<br>adyacente             | Fuente<br>distante               |
|---|---------------------------------|----------------------------------|
|   | Tejido<br>blando                | Médula roja                      |
|   | $DF_{1,I}^{L+H}$ <sup>a,c</sup> | $DF_{2,II}^{L+H}$ <sup>b,c</sup> |
|   | (Gy/(Bqxs))                     | (Gy/(Bqxs))                      |
| Cf-252  | 3.0 E-14                        | 3.0 E-17                         |
| <sup>239</sup> Pu/ <sup>9</sup> Be <sup>d</sup> | 5.0 E-16                        | 5.0 E-19                         |
| <sup>241</sup> Am/ <sup>9</sup> Be <sup>d</sup> | 5.0 E-16                        | 5.0 E-19                         |

<sup>a</sup> Factor de conversión de tasa de dosis para una dosis absorbida en tejido blando según el escenario bolsillo.

<sup>b</sup> Tasa de dosis en la médula roja a una distancia de 1 metro de la fuente.

<sup>c</sup> Las dosis de radiación de baja TLE y de alta TLE se tuvieron en cuenta y se sumaron.

<sup>d</sup> La actividad indicada es la de un radionucleido emisor alfa, por ejemplo el <sup>239</sup>Pu o el <sup>241</sup>Am.

CUADRO 14. FACTORES DE CONVERSIÓN DE TASA DE DOSIS PONDERADA SEGÚN EBR EN TEJIDO BLANDO Y MÉDULA ÓSEA PARA EMISORES DE ALTA TLE (NEUTRONES)

| Fuente de<br>neutrones                          | Origen de<br>los<br>neutrones | Tejido blando        |                      |                      | Médula roja          |                      |                      |
|---|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|   |                               | $AF_{1,I}^L$         | $AF_{1,I}^H$         | $AF_{1,I}$           | $AF_{2,II}^L$        | $AF_{2,II}^H$        | $AF_{2,II}$          |
|   |                               | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs)) | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs)) | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs)) | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs)) | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs)) | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs)) |
| <sup>248</sup> Cm                               | SF <sup>a</sup>               | 1.2E-14              | 1.4E-13              | 1.5E-13              | 2.1E-17              | 2.4E-16              | 2.6E-16              |
| <sup>250</sup> Cf                               | SF                            | 1.1E-16              | 1.5E-15              | 1.6E-15              | 1.8E-19              | 2.4E-18              | 2.6E-18              |
| <sup>252</sup> Cf                               | SF                            | 4.5E-15              | 6.0E-14              | 6.4E-14              | 7.5E-18              | 1.0E-16              | 1.1E-16              |
| <sup>254</sup> Cf                               | SF                            | 1.6E-13              | 2.1E-12              | 2.3E-12              | 2.7E-16              | 3.5E-15              | 3.8E-15              |
| <sup>239</sup> Pu/ <sup>9</sup> Be <sup>b</sup> | ( $\alpha$ ,n)                | 9.0E-18              | 4.0E-17              | 4.9E-17              | 1.5E-20              | 6.7E-20              | 8.2E-20              |
| <sup>241</sup> Am/ <sup>9</sup> Be <sup>b</sup> | ( $\alpha$ ,n)                | 8.9E-17 <sup>c</sup> | 5.0E-17              | 1.4E-16              | 9.4E-20 <sup>c</sup> | 8.4E-20              | 1.8E-19              |

<sup>a</sup> Sigla en inglés de spontaneous fission (fisión espontánea).

<sup>b</sup> La actividad indicada es la de un radionucleido emisor alfa, por ejemplo, el <sup>239</sup>Pu o el <sup>241</sup>Am.

<sup>c</sup> Este radionucleido emite fotones con una energía de 60 keV aproximadamente para la cual la ecuación (64) solamente da una estimación muy imprecisa debido al considerable autoblandaje. Por consiguiente el valor mostrado aquí es la suma del factor de conversión de dosis del <sup>241</sup>Am del Cuadro 15 (en el que se tiene en cuenta el autoblandaje) y el factor calculado mediante la ecuación (64) para los neutrones originados por la producción de neutrones.

CUADRO 15. FACTORES DE CONVERSIÓN DE TASA DE DOSIS PONDERADA SEGÚN EBR PARA EXPOSICIÓN EXTERNA DEBIDA A EMISORES DE BAJA TLE

| Radionucleidos <sup>a</sup> | Fuente                         |                                 |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
|                             | adyacente                      | distante                        |
|                             | Tejido blando                  | Médula roja                     |
|                             | AF <sub>I,I</sub> <sup>b</sup> | AF <sub>2,II</sub> <sup>c</sup> |
|                             | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))           | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))            |
| H-3                         | 7.6E-27                        | 2.9E-29                         |
| Be-7                        | 5.2E-16                        | 8.3E-19                         |
| Be-10                       | 2.4E-18                        | 3.6E-21                         |
| C-11                        | 1.1E-14                        | 1.8E-17                         |
| C-14                        | 1.6E-20                        | 1.8E-23                         |
| N-13                        | 1.1E-14                        | 1.8E-17                         |
| F-18                        | 1.1E-14                        | 1.8E-17                         |
| Na-22                       | 2.2E-14                        | 3.7E-17                         |
| Na-24                       | 3.6E-14                        | 6.3E-17                         |
| Mg-28                       | 3.0E-14                        | 5.1E-17                         |
| Al-26                       | 2.6E-14                        | 4.3E-17                         |
| Si-31                       | 5.2E-17                        | 8.2E-20                         |
| Si-32 +                     | 5.2E-17                        | 8.3E-20                         |
| P-32                        | 5.2E-17                        | 8.3E-20                         |
| P-33                        | 9.3E-20                        | 1.2E-22                         |
| S-35                        | 1.9E-20                        | 2.1E-23                         |
| Cl-36                       | 6.4E-18                        | 9.7E-21                         |
| Cl-38                       | 1.4E-14                        | 2.4E-17                         |
| Ar-37                       | 0.0E+00                        | 0.0E+00                         |
| Ar-39                       | 2.0E-18                        | 3.0E-21                         |
| Ar-41                       | 1.3E-14                        | 2.1E-17                         |
| K-40                        | 1.5E-15                        | 2.6E-18                         |
| K-42                        | 3.1E-15                        | 5.3E-18                         |
| K-43                        | 1.0E-14                        | 1.7E-17                         |
| Ca-41                       | 0.0E+00                        | 0.0E+00                         |
| Ca-45                       | 1.1E-19                        | 1.3E-22                         |
| Ca-47 +                     | 1.1E-14                        | 1.9E-17                         |
| Sc-44                       | 2.2E-14                        | 3.6E-17                         |
| Sc-46                       | 2.0E-14                        | 3.4E-17                         |
| Sc-47                       | 9.7E-16                        | 1.4E-18                         |
| Sc-48                       | 3.3E-14                        | 5.6E-17                         |
| Ti-44 +                     | 2.3E-14                        | 3.7E-17                         |
| V-48                        | 2.9E-14                        | 4.9E-17                         |
| V-49                        | 0.0E+00                        | 0.0E+00                         |
| Cr-51                       | 3.3E-16                        | 5.1E-19                         |
| Mn-52                       | 3.4E-14                        | 5.8E-17                         |
| Mn-53                       | 0.0E+00                        | 0.0E+00                         |
| Mn-54                       | 8.6E-15                        | 1.4E-17                         |
| Mn-56                       | 1.6E-14                        | 2.8E-17                         |
| Fe-52 +                     | 3.2E-14                        | 5.3E-17                         |
| Fe-55                       | 0.0E+00                        | 0.0E+00                         |
| Fe-59                       | 1.2E-14                        | 2.0E-17                         |
| Fe-60 +                     | 1.1E-14                        | 1.9E-17                         |
| Co-55 +                     | 2.0E-14                        | 3.3E-17                         |

| Radionucleidos <sup>a</sup> | Fuente                         |                                 |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
|                             | adyacente                      | distante                        |
|                             | Tejido blando                  | Médula roja                     |
|                             | AF <sub>1,I</sub> <sup>b</sup> | AF <sub>2,II</sub> <sup>c</sup> |
|                             | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))           | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))            |
| Co-56                       | 3.4E-14                        | 5.8E-17                         |
| Co-57                       | 9.6E-16                        | 1.4E-18                         |
| Co-58                       | 1.0E-14                        | 1.7E-17                         |
| Co-58m +                    | 1.0E-14                        | 1.7E-17                         |
| Co-60                       | 2.4E-14                        | 4.1E-17                         |
| Ni-59                       | 0.0E+00                        | 0.0E+00                         |
| Ni-63                       | 2.3E-22                        | 1.2E-25                         |
| Ni-65                       | 5.4E-15                        | 9.1E-18                         |
| Cu-64                       | 2.0E-15                        | 3.2E-18                         |
| Cu-67                       | 1.0E-15                        | 1.6E-18                         |
| Zn-65                       | 5.8E-15                        | 9.8E-18                         |
| Zn-69                       | 8.3E-18                        | 1.2E-20                         |
| Zn-69m+                     | 4.4E-15                        | 7.0E-18                         |
| Ga-67                       | 1.4E-15                        | 2.1E-18                         |
| Ga-68                       | 1.0E-14                        | 1.7E-17                         |
| Ga-72                       | 2.6E-14                        | 4.3E-17                         |
| Ge-68 +                     | 1.0E-14                        | 1.7E-17                         |
| Ge-71                       | 1.9E-23                        | 4.9E-24                         |
| Ge-77 +                     | 1.1E-14                        | 1.8E-17                         |
| As-72                       | 1.9E-14                        | 3.1E-17                         |
| As-73                       | 1.9E-17                        | 1.8E-20                         |
| As-74                       | 8.0E-15                        | 1.3E-17                         |
| As-76                       | 4.7E-15                        | 7.7E-18                         |
| As-77                       | 9.2E-17                        | 1.4E-19                         |
| Se-75                       | 3.7E-15                        | 5.8E-18                         |
| Se-79                       | 2.2E-20                        | 2.4E-23                         |
| Br-76                       | 2.5E-14                        | 4.2E-17                         |
| Br-77                       | 3.3E-15                        | 5.2E-18                         |
| Br-82                       | 2.7E-14                        | 4.4E-17                         |
| Kr-81                       | 5.6E-17                        | 8.7E-20                         |
| Kr-85                       | 2.7E-17                        | 4.3E-20                         |
| Kr-85m                      | 1.5E-15                        | 2.2E-18                         |
| Kr-87                       | 7.9E-15                        | 1.3E-17                         |
| Rb-81                       | 6.4E-15                        | 1.0E-17                         |
| Rb-83                       | 5.2E-15                        | 8.4E-18                         |
| Rb-84                       | 9.4E-15                        | 1.6E-17                         |
| Rb-86                       | 1.0E-15                        | 1.7E-18                         |
| Rb-87                       | 2.2E-19                        | 2.9E-22                         |
| Sr-82                       | 1.2E-14                        | 1.9E-17                         |
| Sr-85                       | 5.3E-15                        | 8.6E-18                         |
| Sr-85m +                    | 6.8E-15                        | 1.1E-17                         |
| Sr-87m                      | 3.4E-15                        | 5.2E-18                         |
| Sr-89                       | 4.3E-17                        | 6.8E-20                         |
| Sr-90 +                     | 1.5E-16                        | 2.4E-19                         |
| Sr-91 +                     | 1.1E-14                        | 1.8E-17                         |
| Sr-92 +                     | 1.6E-14                        | 2.7E-17                         |
| Y-87 +                      | 8.1E-15                        | 1.3E-17                         |
| Y-88                        | 2.5E-14                        | 4.3E-17                         |

| Radionucleidos <sup>a</sup> | Fuente<br>adyacente            | Fuente distante                 |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
|                             | Tejido blando                  | Médula roja                     |
|                             | AF <sub>I,I</sub> <sup>b</sup> | AF <sub>2,II</sub> <sup>c</sup> |
|                             | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))           | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))            |
| Y-90                        | 1.5E-16                        | 2.4E-19                         |
| Y-91                        | 8.2E-17                        | 1.3E-19                         |
| Y-91m +                     | 5.7E-15                        | 9.1E-18                         |
| Y-92                        | 3.1E-15                        | 5.1E-18                         |
| Y-93                        | 1.2E-15                        | 1.9E-18                         |
| Zr-88 +                     | 2.9E-14                        | 5.0E-17                         |
| Zr-93 +                     | 6.0E-20                        | 4.0E-23                         |
| Zr-95 +                     | 1.6E-14                        | 2.6E-17                         |
| Zr-97 +                     | 1.6E-14                        | 2.6E-17                         |
| Nb-93m                      | 2.8E-19                        | 1.9E-22                         |
| Nb-94                       | 1.6E-14                        | 2.7E-17                         |
| Nb-95                       | 7.9E-15                        | 1.3E-17                         |
| Nb-97                       | 6.9E-15                        | 1.1E-17                         |
| Mo-93 +                     | 1.6E-18                        | 1.1E-21                         |
| Mo-99 +                     | 2.5E-15                        | 3.9E-18                         |
| Tc-95m                      | 7.1E-15                        | 1.1E-17                         |
| Tc-96                       | 2.6E-14                        | 4.2E-17                         |
| Tc-96m +                    | 2.6E-14                        | 4.2E-17                         |
| Tc-97                       | 2.3E-18                        | 1.3E-21                         |
| Tc-97m                      | 4.6E-18                        | 4.2E-21                         |
| Tc-98                       | 1.5E-14                        | 2.4E-17                         |
| Tc-99                       | 2.1E-19                        | 2.8E-22                         |
| Tc-99m                      | 1.1E-15                        | 1.6E-18                         |
| Ru-97                       | 2.2E-15                        | 3.4E-18                         |
| Ru-103 +                    | 5.0E-15                        | 7.9E-18                         |
| Ru-105 +                    | 9.0E-15                        | 1.4E-17                         |
| Ru-106 +                    | 2.6E-15                        | 4.3E-18                         |
| Rh-99                       | 5.9E-15                        | 9.4E-18                         |
| Rh-101                      | 2.3E-15                        | 3.6E-18                         |
| Rh-102                      | 2.2E-14                        | 3.6E-17                         |
| Rh-102m                     | 6.0E-15                        | 9.7E-18                         |
| Rh-103m                     | 7.5E-19                        | 3.4E-22                         |
| Rh-105                      | 8.0E-16                        | 1.2E-18                         |
| Pd-103 +                    | 8.0E-18                        | 4.8E-21                         |
| Pd-107                      | 3.9E-24                        | 2.3E-27                         |
| Pd-109                      | 4.3E-17                        | 5.8E-20                         |
| Ag-105                      | 5.2E-15                        | 8.3E-18                         |
| Ag-108m                     | 1.7E-14                        | 2.8E-17                         |
| Ag-110m                     | 2.8E-14                        | 4.7E-17                         |
| Ag-111                      | 2.8E-16                        | 4.4E-19                         |
| Cd-109                      | 3.4E-17                        | 3.3E-20                         |
| Cd-113m                     | 1.6E-18                        | 2.3E-21                         |
| Cd-115 +                    | 4.0E-15                        | 6.4E-18                         |
| Cd-115m                     | 2.7E-16                        | 4.4E-19                         |
| In-111                      | 3.7E-15                        | 5.7E-18                         |
| In-113m                     | 2.7E-15                        | 4.1E-18                         |
| In-114m                     | 9.1E-16                        | 1.4E-18                         |
| In-115m                     | 1.6E-15                        | 2.4E-18                         |
| Sn-113 +                    | 2.7E-15                        | 4.2E-18                         |

| Radionucleidos <sup>a</sup> | Fuente                         |                                 |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
|                             | adyacente                      | distante                        |
|                             | Tejido blando                  | Médula roja                     |
|                             | AF <sub>1,I</sub> <sup>b</sup> | AF <sub>2,II</sub> <sup>c</sup> |
|                             | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))           | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))            |
| Sn-117m                     | 1.3E-15                        | 1.9E-18                         |
| Sn-119m                     | 9.4E-18                        | 3.9E-21                         |
| Sn-121m +                   | 5.9E-18                        | 3.0E-21                         |
| Sn-123                      | 1.0E-16                        | 1.7E-19                         |
| Sn-125                      | 7.3E-15                        | 1.2E-17                         |
| Sn-126 +                    | 2.1E-14                        | 3.3E-17                         |
| Sb-122                      | 4.7E-15                        | 7.6E-18                         |
| Sb-124                      | 1.8E-14                        | 3.0E-17                         |
| Sb-125 +                    | 4.4E-15                        | 7.0E-18                         |
| Sb-126                      | 3.0E-14                        | 4.8E-17                         |
| Te-121                      | 5.9E-15                        | 9.4E-18                         |
| Te-121m +                   | 7.2E-15                        | 1.1E-17                         |
| Te-123m                     | 1.2E-15                        | 1.8E-18                         |
| Te-125m                     | 4.3E-17                        | 2.1E-20                         |
| Te-127                      | 5.4E-17                        | 8.4E-20                         |
| Te-127m +                   | 6.7E-17                        | 9.1E-20                         |
| Te-129                      | 6.1E-16                        | 9.8E-19                         |
| Te-129m +                   | 7.2E-16                        | 1.1E-18                         |
| Te-131m +                   | 1.9E-14                        | 3.1E-17                         |
| Te-132 +                    | 2.6E-14                        | 4.2E-17                         |
| I-123                       | 1.4E-15                        | 2.1E-18                         |
| I-124                       | 1.1E-14                        | 1.8E-17                         |
| I-125                       | 4.9E-17                        | 2.1E-20                         |
| I-126                       | 4.7E-15                        | 7.4E-18                         |
| I-129                       | 3.5E-17                        | 1.7E-20                         |
| I-131                       | 4.0E-15                        | 6.2E-18                         |
| I-132                       | 2.3E-14                        | 3.9E-17                         |
| I-133                       | 6.6E-15                        | 1.1E-17                         |
| I-134                       | 2.7E-14                        | 4.4E-17                         |
| I-135                       | 1.8E-14                        | 3.1E-17                         |
| Xe-122                      | 1.1E-14                        | 1.7E-17                         |
| Xe-123 +                    | 7.4E-15                        | 1.2E-17                         |
| Xe-127                      | 2.5E-15                        | 3.8E-18                         |
| Xe-131m                     | 5.1E-17                        | 5.3E-20                         |
| Xe-133                      | 2.0E-16                        | 2.4E-19                         |
| Xe-135                      | 2.5E-15                        | 3.9E-18                         |
| Cs-129                      | 2.6E-15                        | 4.1E-18                         |
| Cs-131                      | 3.1E-17                        | 1.3E-20                         |
| Cs-132                      | 7.2E-15                        | 1.1E-17                         |
| Cs-134                      | 1.6E-14                        | 2.7E-17                         |
| Cs-134m +                   | 1.6E-14                        | 2.6E-17                         |
| Cs-135                      | 5.2E-20                        | 6.4E-23                         |
| Cs-136                      | 2.2E-14                        | 3.6E-17                         |
| Cs-137 +                    | 5.9E-15                        | 9.6E-18                         |
| Ba-131 +                    | 4.4E-15                        | 6.9E-18                         |
| Ba-133                      | 3.7E-15                        | 5.7E-18                         |
| Ba-133m                     | 2.3E-15                        | 3.4E-18                         |
| Ba-140 +                    | 2.4E-14                        | 4.1E-17                         |

| Radionucleidos <sup>a</sup> | Fuente<br>adyacente            | Fuente distante                 |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
|                             | Tejido blando                  | Médula roja                     |
|                             | AF <sub>I,I</sub> <sup>b</sup> | AF <sub>2,II</sub> <sup>c</sup> |
|                             | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))           | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))            |
| La-137                      | 3.8E-17                        | 1.9E-20                         |
| La-140                      | 2.2E-14                        | 3.8E-17                         |
| Ce-139                      | 1.2E-15                        | 1.8E-18                         |
| Ce-141                      | 6.1E-16                        | 9.2E-19                         |
| Ce-143 +                    | 2.7E-15                        | 4.2E-18                         |
| Ce-144 +                    | 7.6E-16                        | 1.2E-18                         |
| Pr-142                      | 6.6E-16                        | 1.1E-18                         |
| Pr-143                      | 8.2E-18                        | 1.2E-20                         |
| Nd-147 +                    | 1.2E-15                        | 1.9E-18                         |
| Nd-149 +                    | 3.9E-15                        | 6.0E-18                         |
| Pm-143                      | 3.0E-15                        | 4.9E-18                         |
| Pm-144                      | 1.6E-14                        | 2.6E-17                         |
| Pm-145                      | 6.8E-17                        | 4.8E-20                         |
| Pm-147                      | 8.5E-20                        | 1.1E-22                         |
| Pm-148m                     | 2.1E-14                        | 3.4E-17                         |
| Pm-149                      | 1.2E-16                        | 1.9E-19                         |
| Pm-151                      | 3.2E-15                        | 5.0E-18                         |
| Sm-145 +                    | 1.7E-16                        | 1.2E-19                         |
| Sm-147                      | 0.0E+00                        | 0.0E+00                         |
| Sm-151                      | 3.6E-21                        | 1.7E-24                         |
| Sm-153                      | 3.1E-16                        | 4.0E-19                         |
| Eu-147                      | 4.6E-15                        | 7.4E-18                         |
| Eu-148                      | 2.2E-14                        | 3.7E-17                         |
| Eu-149                      | 3.9E-16                        | 5.4E-19                         |
| Eu-150b                     | 4.6E-16                        | 7.3E-19                         |
| Eu-150a                     | 1.5E-14                        | 2.4E-17                         |
| Eu-152                      | 1.1E-14                        | 1.9E-17                         |
| Eu-152m                     | 2.9E-15                        | 4.8E-18                         |
| Eu-154                      | 1.2E-14                        | 2.0E-17                         |
| Eu-155                      | 3.5E-16                        | 4.8E-19                         |
| Eu-156                      | 1.3E-14                        | 2.1E-17                         |
| Gd-146 +                    | 2.7E-14                        | 4.3E-17                         |
| Gd-148                      | 0.0E+00                        | 0.0E+00                         |
| Gd-153                      | 4.9E-16                        | 6.0E-19                         |
| Gd-159                      | 4.5E-16                        | 6.8E-19                         |
| Tb-157                      | 6.4E-18                        | 4.7E-21                         |
| Tb-158                      | 7.7E-15                        | 1.3E-17                         |
| Tb-160                      | 1.1E-14                        | 1.9E-17                         |
| Dy-159                      | 1.2E-16                        | 9.3E-20                         |
| Dy-165                      | 2.4E-16                        | 3.8E-19                         |
| Dy-166 +                    | 4.7E-16                        | 6.8E-19                         |
| Ho-166                      | 2.9E-16                        | 4.7E-19                         |
| Ho-166m                     | 1.8E-14                        | 2.9E-17                         |
| Er-169                      | 2.8E-19                        | 3.9E-22                         |
| Er-171                      | 3.7E-15                        | 5.7E-18                         |
| Tm-167                      | 1.1E-15                        | 1.6E-18                         |
| Tm-170                      | 3.4E-17                        | 4.3E-20                         |
| Tm-171                      | 2.2E-18                        | 2.2E-21                         |
| Yb-169                      | 2.1E-15                        | 3.0E-18                         |

| Radionucleidos <sup>a</sup> | Fuente                         |                                 |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
|                             | adyacente                      | distante                        |
|                             | Tejido blando                  | Médula roja                     |
|                             | AF <sub>I,I</sub> <sup>b</sup> | AF <sub>2,II</sub> <sup>c</sup> |
|                             | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))           | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))            |
| Yb-175                      | 3.9E-16                        | 6.1E-19                         |
| Lu-172                      | 1.8E-14                        | 3.1E-17                         |
| Lu-173                      | 8.0E-16                        | 1.1E-18                         |
| Lu-174                      | 9.1E-16                        | 1.4E-18                         |
| Lu-174m +                   | 1.1E-15                        | 1.6E-18                         |
| Lu-177                      | 3.0E-16                        | 4.6E-19                         |
| Hf-172 +                    | 1.9E-14                        | 3.1E-17                         |
| Hf-175                      | 3.5E-15                        | 5.3E-18                         |
| Hf-181                      | 5.6E-15                        | 8.8E-18                         |
| Hf-182 +                    | 1.4E-14                        | 2.3E-17                         |
| Ta-178a                     | 9.7E-15                        | 1.4E-17                         |
| Ta-179                      | 1.1E-16                        | 1.2E-19                         |
| Ta-182                      | 1.2E-14                        | 2.1E-17                         |
| W-178                       | 7.7E-16                        | 1.1E-18                         |
| W-181                       | 1.5E-16                        | 1.6E-19                         |
| W-185                       | 9.5E-19                        | 1.3E-21                         |
| W-187                       | 4.8E-15                        | 7.8E-18                         |
| W-188 +                     | 6.5E-16                        | 1.0E-18                         |
| Re-184                      | 8.7E-15                        | 1.4E-17                         |
| Re-184m +                   | 1.0E-14                        | 1.7E-17                         |
| Re-186                      | 1.6E-16                        | 2.2E-19                         |
| Re-187                      | 0.0E+00                        | 0.0E+00                         |
| Re-188                      | 6.4E-16                        | 1.0E-18                         |
| Re-189                      | 6.3E-16                        | 9.7E-19                         |
| Os-185                      | 7.2E-15                        | 1.1E-17                         |
| Os-191                      | 4.6E-16                        | 6.3E-19                         |
| Os-191m +                   | 5.0E-16                        | 6.7E-19                         |
| Os-193                      | 6.9E-16                        | 1.1E-18                         |
| Os-194 +                    | 1.0E-15                        | 1.7E-18                         |
| Ir-189                      | 4.7E-16                        | 6.3E-19                         |
| Ir-190                      | 1.5E-14                        | 2.3E-17                         |
| Ir-192                      | 8.5E-15                        | 1.3E-17                         |
| Ir-194                      | 1.0E-15                        | 1.7E-18                         |
| Pt-188 +                    | 1.6E-14                        | 2.7E-17                         |
| Pt-191                      | 2.5E-15                        | 3.8E-18                         |
| Pt-193                      | 1.8E-21                        | 2.3E-23                         |
| Pt-193m                     | 5.0E-17                        | 6.1E-20                         |
| Pt-195m                     | 3.7E-16                        | 4.7E-19                         |
| Pt-197                      | 1.6E-16                        | 2.2E-19                         |
| Pt-197m+                    | 7.8E-16                        | 1.1E-18                         |
| Au-193                      | 1.2E-15                        | 1.7E-18                         |
| Au-194                      | 1.0E-14                        | 1.7E-17                         |
| Au-195                      | 4.0E-16                        | 5.1E-19                         |
| Au-198                      | 4.3E-15                        | 6.7E-18                         |
| Au-199                      | 7.5E-16                        | 1.1E-18                         |
| Hg-194 +                    | 1.0E-14                        | 1.7E-17                         |
| Hg-195m +                   | 3.2E-15                        | 4.9E-18                         |
| Hg-197                      | 3.3E-16                        | 4.2E-19                         |

| Radionucleidos <sup>a</sup> | Fuente<br>adyacente            | Fuente distante                 |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
|                             | Tejido blando                  | Médula roja                     |
|                             | AF <sub>I,I</sub> <sup>b</sup> | AF <sub>2,II</sub> <sup>c</sup> |
|                             | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))           | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))            |
| Hg-197m +                   | 9.8E-16                        | 1.3E-18                         |
| Hg-203                      | 2.4E-15                        | 3.7E-18                         |
| Tl-200                      | 1.3E-14                        | 2.1E-17                         |
| Tl-201                      | 5.3E-16                        | 7.2E-19                         |
| Tl-202                      | 4.6E-15                        | 7.2E-18                         |
| Tl-204                      | 9.4E-18                        | 1.3E-20                         |
| Pb-201 +                    | 7.9E-15                        | 1.2E-17                         |
| Pb-202 +                    | 4.6E-15                        | 7.1E-18                         |
| Pb-203                      | 2.8E-15                        | 4.3E-18                         |
| Pb-205                      | 2.6E-21                        | 3.0E-23                         |
| Pb-210 +                    | 1.8E-17                        | 2.4E-20                         |
| Pb-212 +                    | 1.4E-14                        | 2.3E-17                         |
| Bi-205                      | 1.6E-14                        | 2.7E-17                         |
| Bi-206                      | 3.3E-14                        | 5.3E-17                         |
| Bi-207                      | 1.5E-14                        | 2.6E-17                         |
| Bi-210 +                    | 1.3E-17                        | 2.0E-20                         |
| Bi-210m                     | 2.6E-15                        | 4.0E-18                         |
| Bi-212 +                    | 1.3E-14                        | 2.2E-17                         |
| Po-210                      | 8.8E-20                        | 1.4E-22                         |
| At-211                      | 1.3E-15                        | 2.1E-18                         |
| Rn-222                      | 1.7E-14                        | 2.9E-17                         |
| Ra-223 +                    | 2.8E-15                        | 4.3E-18                         |
| Ra-224 +                    | 1.4E-14                        | 2.4E-17                         |
| Ra-225 +                    | 2.3E-15                        | 3.6E-18                         |
| Ra-226                      | 1.7E-14                        | 2.9E-17                         |
| Ra-228 +                    | 2.1E-14                        | 3.6E-17                         |
| Ac-225                      | 2.2E-15                        | 3.6E-18                         |
| Ac-227 +                    | 3.7E-15                        | 5.8E-18                         |
| Ac-228                      | 2.3E-14                        | 3.9E-17                         |
| Th-227 +                    | 3.8E-15                        | 5.8E-18                         |
| Th-228 +                    | 1.4E-14                        | 2.4E-17                         |
| Th-229 +                    | 2.9E-15                        | 4.4E-18                         |
| Th-230 +                    | 2.3E-18                        | 3.1E-21                         |
| Th-231                      | 7.1E-17                        | 9.4E-20                         |
| Th-232 +                    | 7.7E-15                        | 1.3E-17                         |
| Th-234 +                    | 2.8E-16                        | 4.4E-19                         |
| Pa-230 +                    | 6.4E-15                        | 1.0E-17                         |
| Pa-231 +                    | 8.9E-16                        | 1.3E-18                         |
| Pa-233                      | 1.9E-15                        | 2.9E-18                         |
| U-230 +                     | 1.8E-16                        | 2.8E-19                         |
| U-232 +                     | 1.0E-14                        | 1.8E-17                         |
| U-233                       | 2.7E-18                        | 3.9E-21                         |
| U-234 +                     | 8.2E-19                        | 9.8E-22                         |
| U-235 +                     | 1.5E-15                        | 2.2E-18                         |
| U-236                       | 4.5E-19                        | 4.9E-22                         |
| U-238 +                     | 2.8E-16                        | 4.4E-19                         |
| Np-235                      | 6.5E-18                        | 8.4E-21                         |
| Np-236b +                   | 4.1E-16                        | 6.2E-19                         |
| Np-236a                     | 8.8E-16                        | 1.3E-18                         |

| Radionucleidos <sup>a</sup> | Fuente<br>adyacente            | Fuente distante                 |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
|                             | Tejido blando                  | Médula roja                     |
|                             | AF <sub>1,I</sub> <sup>b</sup> | AF <sub>2,II</sub> <sup>c</sup> |
|                             | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))           | ((Gy-Eq)/<br>(Bqxs))            |
| Np-237 +                    | 2.0E-15                        | 3.1E-18                         |
| Np-239                      | 1.4E-15                        | 2.1E-18                         |
| Pu-236                      | 5.8E-16                        | 9.9E-19                         |
| Pu-237                      | 3.1E-16                        | 4.4E-19                         |
| Pu-238                      | 3.7E-19                        | 3.0E-22                         |
| Pu-239                      | 5.9E-19                        | 7.9E-22                         |
| Pu-240                      | 3.6E-19                        | 2.9E-22                         |
| Pu-241 +                    | 1.1E-20                        | 1.7E-23                         |
| Pu-242                      | 3.1E-19                        | 2.6E-22                         |
| Pu-244 +                    | 3.5E-15                        | 5.7E-18                         |
| Am-241                      | 8.7E-17                        | 9.1E-20                         |
| Am-242m +                   | 1.0E-16                        | 1.4E-19                         |
| Am-243 +                    | 1.7E-15                        | 2.6E-18                         |
| Am-244                      | 8.1E-15                        | 1.3E-17                         |
| Cm-240                      | 5.2E-16                        | 8.9E-19                         |
| Cm-241 +                    | 4.8E-15                        | 7.6E-18                         |
| Cm-242                      | 4.7E-19                        | 3.3E-22                         |
| Cm-243                      | 1.1E-15                        | 1.7E-18                         |
| Cm-244                      | 3.5E-19                        | 2.0E-22                         |
| Cm-245                      | 6.5E-16                        | 9.6E-19                         |
| Cm-246                      | 3.2E-19                        | 1.9E-22                         |
| Cm-247                      | 3.4E-15                        | 5.3E-18                         |
| Bk-247                      | 8.2E-16                        | 1.2E-18                         |
| Bk-249                      | 5.9E-17                        | 9.2E-20                         |
| Cf-248 +                    | 4.7E-19                        | 2.4E-22                         |
| Cf-249                      | 3.4E-15                        | 5.3E-18                         |
| Cf-251                      | 1.0E-15                        | 1.6E-18                         |
| Cf-253                      | 6.1E-17                        | 9.6E-20                         |

<sup>a</sup> Al calcular los factores de dosis para todos los radionucleidos se tuvo en cuenta el aumento interno de la progenie radiactiva, como se expone en el Apéndice VIII. El símbolo '+' indica los radionucleidos en cuyo caso la progenie fue una fuente significativa de dosis en los escenarios considerados.

<sup>b</sup> Factor de conversión de tasa de dosis ponderada según EBR en tejido blando según el escenario bolsillo.

<sup>c</sup> Tasa de dosis ponderada según EBR en la médula roja a una distancia de 1 metro de la fuente.

## APÉNDICE V

### FACTORES DE CONVERSIÓN DE DOSIS POR INHALACIÓN, INMERSIÓN Y CONTAMINACIÓN DE LA PIEL UTILIZADOS EN EL ENFOQUE EXPERTO

En los factores de conversión de dosis utilizados para calcular los valores  ${}^E D_2$  se incluyeron los factores correspondientes a inhalación, contaminación de la piel e inmersión.

#### V.1. INHALACIÓN

Se consideró que la inhalación de material radiactivo dispersado era una vía fundamental para dicho cálculo. En el Apéndice II se dan detalles sobre las propiedades químicas y físicas del material radiactivo, así como sobre el "escenario inhalación" (Escenario III E). Los valores de los factores de conversión de dosis utilizados para calcular los valores  ${}^E D_2$  se enumeran en los Cuadros 16 y 17. Excepto cuando se indique otra cosa, los factores de dosis en la médula roja y el tracto respiratorio se fundaron en la base de datos de tasa de dosis absorbida "pulmonar" que figura en la Ref. [49]. Esta base de datos presenta factores de dosis para los tres tipos de absorción de partículas por el pulmón definidos en el Modelo de Tracto Respiratorio Humano de la CIPR [11, 16] (es decir, F, M y S) suponiendo un DAMA de una micra. También se consideraron otras formas físicas (p. ej. gas y vapor). Debe señalarse que la "dosis en el pulmón" de la Ref. [49] es la suma ponderada de la dosis absorbida en los distintos tejidos de la región torácica del tracto respiratorio, que es análoga a la dosis efectiva, y refleja la exposición interna no uniforme de los tejidos del tracto respiratorio. Estos tejidos tienen distintas sensibilidades a la radiación en lo que se refiere al desarrollo de efectos estocásticos en la salud. Por lo tanto, con el fin de evitar confusiones, se utiliza el término "región torácica" para denominar el órgano crítico que se supuso desarrollaba una lesión pulmonar grave en el enfoque experto. Como se explica en la Ref. [15], para la evaluación de la neumonitis hubiera sido más adecuado utilizar la dosis en la región alveolar del tracto respiratorio, lo mismo que se hizo en el enfoque riesgo.

Los factores de dosis relativos a materiales que contienen el mismo radionucleido pero están asignados a diferentes tasas de absorción pulmonar son distintos. En el enfoque experto, para la médula roja y el tracto respiratorio se utilizó el factor de dosis correspondiente a la forma o tipo de adsorción que producía la dosis comprometida más elevada en el órgano. En el Cuadro 17 se indica para cada radionucleido el valor del máximo factor de conversión de dosis aplicable a un determinado órgano o tejido. Los tipos de materiales tenidos en cuenta para evaluar los valores  ${}^E D_2$  resultantes del Escenario III E se tomaron del Cuadro II-VIII de la Ref. [11]. Los factores de conversión y los parámetros del escenario utilizados se refieren a la exposición de un miembro adulto de referencia de la población. La utilización de estos factores de conversión para otros grupos de edad tendría como resultado una sobreestimación de la dosis comprometida. Tomando como base las opiniones de expertos, los valores de la dosis comprometida a lo largo de 365 días por radiación de alta TLE en la región torácica del tracto respiratorio se estimaron multiplicando por cuatro la dosis absorbida comprometida a lo largo de 30 días de la Ref. [49]. El factor de conversión de dosis para el  ${}^{252}\text{Cf}$  no se indicó en la Ref. [49]. En consecuencia, se estimó multiplicando el factor de conversión de dosis correspondiente al  ${}^{241}\text{Am}$  por la relación entre la dosis efectiva para el  ${}^{252}\text{Cf}$  y la dosis efectiva para el  ${}^{241}\text{Am}$  de la Ref. [11]. Esta relación es aproximadamente 0.5.

Para la exposición de la tiroides consecutiva a una inhalación se utilizaron los factores de dosis absorbida de la Ref. [28]. Estos factores corresponden a un compromiso de por vida pero, considerando el periodo de semidesintegración físico y biológico de los radionucleidos que dan lugar a dosis significativas en la tiroides (isótopos del I y el Te), tales factores de dosis correspondían en realidad a un periodo de compromiso muy inferior a 365 días; no obstante, se adoptó un periodo de compromiso ( $\Delta$ ) de 365 días.

## V.2. CONTAMINACIÓN DE LA PIEL

En el enfoque experto se utilizaron los factores de conversión de dosis de la Ref. [35] para estimar la exposición por contacto de la piel debida a una superficie contaminada. Estos factores de dosis son aplicables a la capa basal de la piel a 70  $\mu\text{m}$  (7  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) bajo su superficie. No obstante, los efectos deterministas en la piel a largo plazo debidos a una exposición aparecen principalmente a una profundidad de 300-500  $\mu\text{m}$  [17, 18]. Por lo tanto, si se utilizan para indicar la existencia de efectos deterministas graves en la salud, los cálculos basados en los factores de dosis de la Ref. [35] deberían ser conservadores. Los factores de conversión de dosis empleados para evaluar la exposición por contacto de la piel en el enfoque experto se presentan en el Cuadro 16.

CUADRO 16. FACTORES DE CONVERSIÓN DE DOSIS ABSORBIDA COMPROMETIDA POR INHALACIÓN Y DE DOSIS ABSORBIDA POR CONTAMINACIÓN

| Radionucleido <sup>a</sup> | Inhalación                              |                                      |   | Contaminación                |
|----------------------------|---|--------------------------------------|---|------------------------------|
|                            | Médula roja                             | Tracto respiratorio baja TLE         | Tracto respiratorio alta TLE            | Membrana basal de la piel    |
|                            | $DF_{2,III}^{L+H}(\Delta)$ <sup>b</sup> | $DF_{3E,III}^L(\Delta)$ <sup>c</sup> | $DF_{3E,III}^{HS}(\Delta)$ <sup>d</sup> | $DF_{6E,V}^L$ <sup>e</sup>   |
|                            | (Gy/Bq)                                 | (Gy/Bq)                              | (Gy/Bq)                                 | (Gy/(Bqxs/cm <sup>2</sup> )) |
| H-3                        | 2.2E-12                                 | 5.4E-12                              | DES <sup>f</sup>                        | 0.0E+00                      |
| C-14                       | 6.5E-12                                 | 1.1E-09                              | DES                                     | 8.8E-11                      |
| P-32                       | 2.5E-10                                 | 3.6E-09                              | DES                                     | 4.7E-10                      |
| S-35                       | 1.7E-11                                 | 1.1E-09                              | DES                                     | 9.4E-11                      |
| Cl-36                      | 3.5E-11                                 | 2.8E-09                              | DES                                     | 4.4E-10                      |
| Cr-51                      | 2.2E-12                                 | 1.1E-11                              | DES                                     | 2.8E-13                      |
| Fe-55                      | 1.3E-11                                 | 5.6E-12                              | DES                                     | 2.8E-13                      |
| Co-57                      | 7.4E-12                                 | 1.6E-10                              | DES                                     | 2.1E-11                      |
| Co-60                      | 1.3E-10                                 | 2.4E-09                              | DES                                     | 2.9E-10                      |
| Ni-63                      | 2.8E-12                                 | 1.1E-09                              | DES                                     | 2.8E-13                      |
| Zn-65                      | 3.6E-11                                 | 1.5E-10                              | DES                                     | 6.7E-12                      |
| Ge-68                      | 9.4E-11                                 | 3.4E-08                              | DES                                     | 4.2E-10                      |
| Se-75                      | 2.4E-11                                 | 2.9E-10                              | DES                                     | 2.8E-11                      |
| Sr-89                      | 2.5E-10                                 | 3.4E-09                              | DES                                     | 4.6E-10                      |
| Sr-90+                     | 1.8E-10                                 | ( ) <sup>g</sup>                     | DES                                     | 8.8E-10                      |
| Y-90                       | 3.4E-10                                 | 3.5E-09                              | DES                                     | 4.7E-10                      |
| Y-91                       | 2.9E-10                                 | 3.5E-09                              | DES                                     | 4.6E-10                      |
| Zr-95+                     | 1.2E-10                                 | 2.3E-09                              | DES                                     | 3.3E-10                      |
| Nb-95                      | 5.9E-11                                 | 1.1E-09                              | DES                                     | 4.0E-10                      |
| Nb-95m+                    | 6.0E-11                                 | 2.0E-09                              | DES                                     | ND <sup>h</sup>              |
| Mo-99+                     | 7.7E-11                                 | 2.7E-09                              | DES                                     | 5.1E-10                      |
| Tc-99m                     | 1.7E-12                                 | 8.4E-11                              | DES                                     | 6.5E-11                      |
| Ru-103+                    | 9.0E-11                                 | 2.0E-09                              | DES                                     | 1.8E-10                      |
| Ru-106+                    | 2.9E-10                                 | 5.7E-09                              | DES                                     | 4.9E-10                      |
| Pd-103+                    | 4.9E-13                                 | 4.5E-10                              | DES                                     | 2.8E-13                      |
| Cd-109                     | 5.2E-12                                 | 2.1E-09                              | DES                                     | 1.4E-10                      |
| Te-132+                    | 3.3E-10                                 | 4.4E-09                              | DES                                     | 6.6E-10                      |
| I-125                      | 2.9E-12                                 | 1.0E-10                              | DES                                     | 2.8E-13                      |
| I-129                      | 5.2E-12                                 | 1.2E-09                              | DES                                     | ND                           |
| I-131                      | 3.3E-11                                 | 2.4E-09                              | DES                                     | 4.0E-10                      |
| Cs-134                     | 1.1E-10                                 | 2.3E-09                              | DES                                     | 3.0E-10                      |
| Cs-137+                    | 6.5E-11                                 | 2.9E-09                              | DES                                     | 4.4E-10                      |
| Ba-133                     | 5.4E-11                                 | 8.9E-10                              | DES                                     | 2.7E-11                      |
| Ce-141                     | 5.7E-11                                 | 2.9E-09                              | DES                                     | 4.8E-10                      |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Inhalación                              |                                      |   | Contaminación                |
|----------------------------|---|--------------------------------------|---|------------------------------|
|                            | Médula roja                             | Tracto respiratorio baja TLE         | Tracto respiratorio alta TLE            | Membrana basal de la piel    |
|                            | $DF_{2,III}^{L+H}(\Delta)$ <sup>b</sup> | $DF_{3E,III}^L(\Delta)$ <sup>c</sup> | $DF_{3E,III}^{HS}(\Delta)$ <sup>d</sup> | $DF_{6E,V}^L$ <sup>e</sup>   |
|                            | (Gy/Bq)                                 | (Gy/Bq)                              | (Gy/Bq)                                 | (Gy/(Bq×s/cm <sup>2</sup> )) |
| Ce-144+                    | 3.4E-10                                 | 7.4E-09                              | DES                                     | 7.3E-10                      |
| Pm-147                     | 2.7E-11                                 | 1.4E-09                              | DES                                     | 1.6E-10                      |
| Eu-152                     | 1.4E-10                                 | 1.9E-09                              | DES                                     | 2.1E-10                      |
| Eu-154                     | 2.0E-10                                 | 4.0E-09                              | DES                                     | 5.0E-10                      |
| Gd-153                     | 2.9E-11                                 | 7.9E-10                              | DES                                     | 3.1E-11                      |
| Tm-170                     | 2.0E-10                                 | 3.2E-09                              | DES                                     | 4.5E-10                      |
| Yb-169                     | 8.6E-11                                 | 2.3E-09                              | DES                                     | 2.7E-10                      |
| Re-188                     | 3.4E-11                                 | 2.3E-09                              | DES                                     | 5.2E-10                      |
| Ir-192                     | 5.9E-11                                 | 3.0E-09                              | DES                                     | 4.5E-10                      |
| Au-198                     | 3.7E-11                                 | 2.4E-09                              | DES                                     | 4.6E-10                      |
| Hg-203                     | 3.3E-11                                 | 2.8E-08                              | DES                                     | 2.5E-10                      |
| Po-210                     | 2.1E-09                                 | DES                                  | 3.9E-06                                 | 2.8E-13                      |
| Ra-226+                    | 3.9E-09                                 | DES                                  | 3.8E-06                                 | 1.0E-09                      |
| Th-230                     | 2.3E-09                                 | DES                                  | 3.4E-06                                 | ND                           |
| Th-232                     | 2.0E-09                                 | DES                                  | 2.5E-06                                 | ND                           |
| U-232                      | 9.2E-10                                 | DES                                  | 4.4E-06                                 | 1.5E-12                      |
| U-234                      | 8.2E-10                                 | DES                                  | 3.2E-06                                 | ND                           |
| U-235+                     | 2.8E-09                                 | DES                                  | 3.2E-06                                 | ND                           |
| U-237                      | 3.8E-11                                 | 3.6E-09                              | DES                                     | ND                           |
| U-238                      | 7.3E-10                                 | DES                                  | 2.8E-06                                 | ND                           |
| U natural                  | ND                                      | DES                                  | 2.8E-06                                 | ND                           |
| U empobrecido              | ND                                      | DES                                  | 2.8E-06                                 | ND                           |
| U enriquecido              | ND                                      | DES                                  | 3.2E-06                                 | ND                           |
| Np-237+                    | 1.8E-09                                 | DES                                  | 3.5E-06                                 | ND                           |
| Pu-238                     | 1.7E-09                                 | DES                                  | 4.4E-06                                 | 2.8E-13                      |
| Pu-239                     | 1.6E-09                                 | DES                                  | 3.9E-06                                 | ND                           |
| Pu-240                     | 1.6E-09                                 | DES                                  | 3.9E-06                                 | ND                           |
| Pu-241+                    | 2.1E-11                                 | DES                                  | 8.9 E-08                                | 2.8E-13                      |
| Pu-242                     | 1.5E-09                                 | DES                                  | 3.6E-06                                 | ND                           |
| Am-241                     | 1.6E-09                                 | DES                                  | 4.4E-06                                 | 7.4E-13                      |
| Cm-242                     | 1.7E-09                                 | DES                                  | 5.2E-06                                 | 2.8E-13                      |
| Cm-244                     | 1.7E-09                                 | DES                                  | 4.8E-06                                 | 2.8E-13                      |
| Cf-252                     | ND                                      | 2.3E-10                              | 2.2E-06 <sup>j</sup>                    | ND                           |

<sup>a</sup> Al calcular los factores de dosis para todos los radionucleidos se tuvo en cuenta el aumento interno de la progenie radiactiva antes de la incorporación, como se expone en el Apéndice VIII. El símbolo '+' indica los radionucleidos en cuyo caso la progenie fue una fuente significativa de dosis para los escenarios considerados.

<sup>b</sup> Factor de conversión de dosis para la dosis absorbida comprometida a lo largo de 2 días causada al Tejido 2 (médula roja) por la inhalación de 1 Bq de un radionucleido emisor de cualquier mezcla de radiación de baja TLE y alta TLE de la Ref. [49].

<sup>c</sup> Factor de conversión de dosis para la dosis absorbida comprometida a lo largo de 2 días causada al Tejido 3E (región torácica del tracto respiratorio) por la inhalación de 1 Bq de un radionucleido emisor de radiación de baja TLE de la Ref. [49].

<sup>d</sup> Factor de conversión de dosis para la dosis absorbida comprometida a lo largo de 365 días causada al Tejido 3E (región torácica del tracto respiratorio) por la inhalación de 1 Bq de un aerosol Tipo S de un radionucleido emisor de radiación de alta TLE. Se consideró que la dosis comprometida a lo largo de 365 días era igual a 4 veces la dosis comprometida a lo largo de 30 días de la Ref. [49].

<sup>e</sup> Factor de conversión de dosis para la tasa de dosis absorbida en el Tejido 6E (membrana basal de la piel) causada por una unidad de actividad superficial de un radionucleido emisor de radiación de baja TLE.

<sup>f</sup> "DES" significa "despreciable".

- <sup>g</sup> Para el caso especial del compuesto insoluble  $^{90}\text{SrTiO}_3$ , como se explica en el Apéndice I, se utilizó el factor de conversión de dosis absorbida comprometida a lo largo de 365 días en el Tejido 3E (región torácica del tracto respiratorio), que es  $3.7\text{E}-07$  Gy/Bq.
- <sup>h</sup> "ND" significa "no hay datos".
- <sup>i</sup> El factor de conversión de dosis del  $^{252}\text{Cf}$  se estimó multiplicando el factor de conversión de dosis del  $^{241}\text{Am}$  por la relación entre la dosis efectiva del  $^{252}\text{Cf}$  y la dosis efectiva del  $^{241}\text{Am}$  de la Ref. [11]. Esta relación es 0.5.

CUADRO 17. FACTORES DE DOSIS ABSORBIDA COMPROMETIDA EN LA TIROIDES POR INHALACIÓN

| Radionucleido <sup>a</sup> | Tiroides                                       |
|----------------------------|--|
|                            | $DF_{5,III}^L(\Delta)$ <sup>b</sup><br>(Gy/Bq) |
| Te-132+                    | 5.8E-08  |
| I-125                      | 2.2E-07  |
| I-129                      | 1.6E-06  |
| I-131                      | 2.9E-07  |

- <sup>a</sup> Para todos los demás radionucleidos considerados en el enfoque experto la dosis en la tiroides es despreciable.
- <sup>b</sup> El factor de conversión de dosis para la dosis absorbida comprometida a lo largo de 365 días en el Tejido 5 (tiroides) debida a una incorporación de 1 Bq de un radionucleido trazador de la tiroides emisor de radiación de baja TLE. Este valor se considera igual a la dosis comprometida de por vida de la Ref. [28].

### V.3. INMERSIÓN

En el enfoque experto se utilizaron los factores de dosis por inmersión de la Ref. [40]. Se supuso la inmersión en una nube semi-infinita de gas noble radiactivo, lo que representaría una sobreestimación respecto a la inmersión en la habitación de  $300\text{ m}^3$  del Escenario VI. En el enfoque experto solo se trató el  $^{85}\text{Kr}$  como fuente de inmersión. Este radionucleido emite radiación de baja TLE y, por lo tanto, se consideró que su factor de conversión de tasa de dosis absorbida,  $DF_{2,VI}^L$ , es numéricamente igual al factor de conversión de dosis ponderada según EBR,  $AF_{2,VI}$ , presentado en el Cuadro 20 para el  $^{85}\text{Kr}$ .

## APÉNDICE VI

### FACTORES DE CONVERSIÓN DE DOSIS POR INHALACIÓN, INGESTIÓN, INMERSIÓN Y CONTAMINACIÓN DE LA PIEL UTILIZADOS EN EL ENFOQUE RIESGO

Los factores de conversión de dosis utilizados para calcular los valores  ${}^R D_2$  incluyen los factores correspondientes a inhalación, ingestión, contaminación de la piel e inmersión, y se presentan en los Cuadros 18, 19 y 20.

#### VI.1. INHALACIÓN E INGESTIÓN

La base de datos dosimétricos del ORNL [49] fue la fuente principal de datos utilizados para calcular los factores de conversión de dosis aplicables a la inhalación e ingestión de material radiactivo dispersado. La base de datos dosimétricos de la CIPR [50] se utilizó como fuente de datos adicional para el cálculo de los valores  ${}^R D_2$ . Se tomaron datos de esta fuente para los radionucleidos no incluidos en la base de datos dosimétricos del ORNL. Estos datos se han marcado con un asterisco (\*) en los Cuadros 18 y 19. Los factores de conversión y los parámetros del escenario reflejan la exposición de un miembro adulto de referencia de la población. El uso de estos factores para otros grupos de edad tendría como resultado una sobreestimación de la dosis comprometida. Se tuvo en cuenta la contribución al factor de dosis de las progenies presentes en el aire respirado, como se explica en el Apéndice VIII. Si dicha contribución sobrepasaba varios puntos porcentuales, el radionucleido padre se marca con un signo más (+) en los cuadros.

En el enfoque riesgo se utilizó una dosis ponderada según EBR comprometida por exposición interna de un órgano o un tejido T a través de una vía (escenario de exposición) S,  $AF_{T,S}(\Delta)$ , para caracterizar la incorporación del radionucleido. Esta magnitud se define para la ecuación (4). En caso de inhalación o de ingestión, la CIPR asigna el material radiactivo a uno de los diversos tipos [11, 16] de inhalación o ingestión<sup>22</sup>. Los factores de dosis para materiales que contengan el mismo radionucleido pero estén asignados a tipos diferentes son distintos. Para cada radionucleido los cuadros indican los factores de conversión de dosis máximos relativos a un determinado órgano o tejido. Los tipos de materiales considerados en el cálculo de los valores  ${}^R D_2$  en los Escenarios IIIR y IV se tomaron de los Cuadros II-V, II-IX y II-IV de la Ref. [11]. Se utilizaron los siguientes factores de conversión de dosis comprometida:

- a)  $AF_{2,IIIR}(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días causada según el Escenario IIIR en el Tejido 2 (médula roja) por una incorporación por inhalación de 1 Bq de un radionucleido, (Gy-Eq)/Bq;
- b)  $AF_{3R,IIIR}(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días causada según el Escenario IIIR en el Tejido 3R (región alveolar-intersticial del tracto respiratorio) por una incorporación por inhalación de 1 Bq de un radionucleido, (Gy-Eq)/Bq;
- c)  $AF_{4,IIIR}(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días causada según el escenario IIIR en el Tejido 4 (colon)<sup>23</sup> por una incorporación por inhalación de 1 Bq de un radionucleido, (Gy-Eq)/Bq;
- d)  $AF_{5,IIIR}(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 365 días causada según el escenario IIIR en el Tejido 5 (tiroides) por una incorporación por inhalación de 1 Bq de un radionucleido, (Gy-Eq)/Bq;

---

<sup>22</sup> Los tipos de ingestión son necesarios debido a los distintos factores de absorción intestinal.

<sup>23</sup> La dosis al colon se calculó como dosis promediado en la masa del intestino grueso conforme a la recomendación de la CIPR en la Ref. [20].

- e)  $AF_{2,IV}(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días causada según el Escenario IV en el Tejido 2 (médula roja) por una incorporación por ingestión de 1 Bq de un radionucleido, (Gy-Eq)/Bq;
- f)  $AF_{4,IV}(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días causada según el Escenario IV en el Tejido 4 (colon)<sup>23</sup> por una incorporación por ingestión de 1 Bq de un radionucleido, (Gy-Eq)/Bq; y
- g)  $AF_{5,IV}(\Delta)$  es el factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada EBR comprometida a lo largo de 365 días causada según el escenario IV en el Tejido 5 (tiroides) por una incorporación por ingestión de 1 Bq de un radionucleido, (Gy-Eq)/Bq.

Para los casos de inhalación y de ingestión, el suplemento de la base de datos dosimétricos del ORNL [49] y también los datos dosimétricos de la Ref. [51] contienen los valores de las tasas de dosis de radiación de baja y alta TLE en 29 órganos o tejidos de personas de diferentes edades (individuos de referencia de seis grupos de edad). Para los casos de inhalación solo hay disponibles datos de aerosoles con un DAMA de 1  $\mu\text{m}$ . Respecto de cada órgano o tejido se enumeran las tasas de dosis absorbida correspondientes a 128 instantes de tiempo entre los días cero y 27 500 siguientes a la incorporación. Al utilizar estas bases de datos para calcular los factores de conversión de dosis comprometida, el valor de  $AF_{T,S}(\Delta)$  se obtuvo por integración numérica de la tasa de dosis absorbida:

$$AF_{T,S}(\Delta) = \int_0^{\Delta} \left[ RBE_T^L \times \dot{d}_{T,S}^L(t) + RBE_T^H \times \dot{d}_{T,S}^H(t) \right] dt, \quad (67)$$

donde:

$\dot{d}_{T,S}^L(t)$  y  $\dot{d}_{T,S}^H(t)$  son la tasa de dosis absorbida en un órgano o tejido T a raíz de una incorporación de 1 Bq del radionucleido asignado a la vía S, (Gy/(Bqxs)), y se indican en las Refs. [49, 51];

$RBE_T^L$  y  $RBE_T^H$  son los coeficientes de eficacia biológica relativa de radiación de baja y alta TLE para la producción de efectos deterministas graves en un órgano o tejido T, ((Gy-Eq)/Gy), y se presentan en el Cuadro 10; y

$\Delta$  es un límite superior del tiempo de integración, (d), y se indica en el Cuadro 10.

La base de datos dosimétricos de la CIPR [50] contiene los valores de los factores de conversión de dosis  $HF_{T,S}(\Delta)$  iguales a la dosis de radiación ponderada comprometida en función del tiempo ( $\Delta$ ) a raíz de una única incorporación por ingestión o inhalación de 1 Bq de un radionucleido por la población (personas de referencia de seis grupos de edad) y por trabajadores. En el caso de los radionucleidos emisores únicamente de radiación de baja TLE, los valores de  $HF_{T,S}(\Delta)$ , (Sv), y  $AF_{T,S}(\Delta)$ , (Gy-Eq), son numéricamente iguales y vienen dados por:

$$AF_{T,S}(\Delta) = \frac{RBE_T^L}{w_L} HF_{T,S}(\Delta), \quad (68)$$

donde:

$RBE_T^L$  es la eficacia biológica relativa de radiación de baja TLE, ((Gy-Eq)/Gy), y figura en el Cuadro 10; y

$w_L$  es el factor de ponderación para una radiación de baja TLE igual 1 Sv/Gy [20].

Para la mayoría de los radionucleidos emisores alfa y radionucleidos con una alta probabilidad de fisión espontánea (enumerados en el Cuadro 27), la radiación de alta TLE es el principal factor contribuyente a la dosis absorbida en el órgano o tejido crítico [15]. En este caso concreto:

$$AF_{T,S}(\Delta) = \frac{RBE_T^H}{w_H} HF_{T,S}(\Delta), \quad (69)$$

donde:

$RBE_T^H$  es la eficacia biológica relativa específica del efecto para radiación de alta TLE, ((Gy-Eq)/Gy), y se indica en el Cuadro 10; y

$w_H$  es el factor de ponderación para una radiación de alta TLE igual a 20 Sv/Gy en el caso de las partículas alfa, definido por la CIPR [20], e igual a 12 Sv/Gy para los espectros de radiación de neutrones de interés.

Las ecuaciones (68) y (69) son válidas para todos los radionucleidos de  $Z < 80$  y para la mayoría de los radionucleidos de  $Z > 81$  enumerados en el Cuadro 1. Los siguientes ocho radionucleidos constituyen las únicas excepciones:  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$ ,  $^{210\text{m}}\text{Bi}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{230}\text{Pa}$ ,  $^{236\text{b}}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  y  $^{242\text{m}}\text{Am}$ . Estos radionucleidos tienen cadenas de desintegración radiactiva complejas con progenies emisoras de radiaciones de distintas TLE que contribuyen de modo significativo a la dosis de radiación ponderada.

Los factores de conversión de dosis ponderada según EBR comprometida por inhalación utilizados en el enfoque riesgo se presentan en el Cuadro 18.

CUADRO 18. FACTORES DE CONVERSIÓN DE DOSIS PONDERADA SEGÚN EBR COMPROMETIDA POR INHALACIÓN

| Radionucleido <sup>a</sup> | Inhalación                               |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|--|
|                            | Médula roja                              | Región AI  | Colon                                    | Tiroides                                 |
|                            | $AF_{2,\text{IIR}}(\Delta)$ <sup>b</sup> | $AF_{3\text{R},\text{IIR}}(\Delta)$ <sup>c</sup> | $AF_{4,\text{IIR}}(\Delta)$ <sup>d</sup> | $AF_{5,\text{IIR}}(\Delta)$ <sup>e</sup> |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                             | ((Gy-Eq)/Bq)                                     | ((Gy-Eq)/Bq)                             | ((Gy-Eq)/Bq)                             |
| H-3                        | 2.1E-11                                  | 2.1E-11  | 2.1E-11                                  | NA <sup>f</sup>                          |
| Be-7                       | 1.5E-11                                  | 1.0E-10  | 2.4E-11                                  | NA                                       |
| Be-10                      | 7.1E-11                                  | 1.0E-08  | 1.9E-09                                  | NA                                       |
| C-11                       | 2.0E-12                                  | 2.1E-12  | 2.2E-12                                  | NA                                       |
| C-14                       | 2.8E-12                                  | 2.8E-12  | 2.8E-12                                  | NA                                       |
| N-13                       | 0.0E+00                                  | 0.0E+00  | 0.0E+00                                  | NA                                       |
| F-18 (*)                   | 2.7E-11                                  | 5.3E-11  | 2.9E-12                                  | NA                                       |
| Na-22                      | 1.2E-09                                  | 7.5E-10  | 8.7E-10                                  | NA                                       |
| Na-24 (*)                  | 1.5E-10                                  | 1.2E-10  | 1.1E-10                                  | NA                                       |
| Mg-28 (*)                  | 5.5E-10                                  | 2.6E-09  | 2.4E-09                                  | NA                                       |
| Al-26                      | 4.4E-09                                  | 2.0E-08  | 4.4E-09                                  | NA                                       |
| Si-31 (*)                  | 4.3E-12                                  | 1.4E-10  | 1.2E-10                                  | NA                                       |
| Si-32 +                    | 2.9E-09                                  | 2.8E-08  | 2.5E-09                                  | NA                                       |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Inhalación                            |  |                                       |                                       |
|----------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                            | Médula roja                           | Región AI                              | Colon                                 | Tiroides                              |
|                            | AF <sub>2,IIIR</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>3R,IIIR</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>4,IIIR</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>5,IIIR</sub> (Δ) <sup>e</sup> |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                          | ((Gy-Eq)/Bq)                           | ((Gy-Eq)/Bq)                          | ((Gy-Eq)/Bq)                          |
| P-32                       | 2.6E-09                               | 1.3E-08                                | 1.2E-09                               | NA                                    |
| P-33                       | 1.3E-10                               | 1.8E-09                                | 1.4E-10                               | NA                                    |
| S-35                       | 2.2E-10                               | 1.5E-09                                | 3.1E-10                               | NA                                    |
| Cl-36                      | 2.4E-10                               | 9.3E-09                                | 2.7E-10                               | NA                                    |
| Cl-38 (*)                  | 4.1E-12                               | 8.2E-11                                | 4.3E-12                               | NA                                    |
| Ar-37(*)                   | 0.0E+00                               | 0.0E+00                                | 0.0E+00                               | NA                                    |
| Ar-39 (*)                  | 0.0E+00                               | 0.0E+00                                | 0.0E+00                               | NA                                    |
| Ar-41 (*)                  | 0.0E+00                               | 0.0E+00                                | 0.0E+00                               | NA                                    |
| K-40                       | 8.4E-10                               | 8.5E-10                                | 2.3E-09                               | NA                                    |
| K-42 (*)                   | 7.6E-11                               | 9.6E-11                                | 1.2E-10                               | NA                                    |
| K-43 (*)                   | 6.7E-11                               | 7.0E-11                                | 9.5E-11                               | NA                                    |
| Ca-41                      | 3.2E-12                               | 9.2E-11                                | 1.9E-11                               | NA                                    |
| Ca-45                      | 8.3E-11                               | 2.4E-09                                | 5.2E-10                               | NA                                    |
| Ca-47 +                    | 2.6E-10                               | 4.5E-09                                | 2.3E-09                               | NA                                    |
| Sc-44 (*)                  | 1.7E-11                               | 2.6E-10                                | 3.1E-10                               | NA                                    |
| Sc-46                      | 5.5E-10                               | 8.1E-09                                | 1.7E-09                               | NA                                    |
| Sc-47                      | 9.9E-12                               | 1.2E-09                                | 8.7E-10                               | NA                                    |
| Sc-48                      | 1.8E-10                               | 1.6E-09                                | 1.8E-09                               | NA                                    |
| Ti-44 +                    | 2.1E-09                               | 3.0E-08                                | 5.6E-09                               | NA                                    |
| V-48                       | 7.5E-10                               | 6.2E-09                                | 2.2E-09                               | NA                                    |
| V-49                       | 5.5E-12                               | 1.5E-10                                | 3.3E-11                               | NA                                    |
| Cr-51                      | 1.0E-11                               | 2.0E-10                                | 4.7E-11                               | NA                                    |
| Mn-52                      | 8.3E-10                               | 2.7E-09                                | 1.5E-09                               | NA                                    |
| Mn-53                      | 2.7E-11                               | 1.8E-10                                | 3.7E-11                               | NA                                    |
| Mn-54                      | 5.6E-10                               | 1.9E-09                                | 5.5E-10                               | NA                                    |
| Mn-56 (*)                  | 2.1E-11                               | 1.9E-10                                | 1.8E-10                               | NA                                    |
| Fe-52 +                    | 8.8E-10                               | 1.0E-09                                | 1.6E-09                               | NA                                    |
| Fe-55                      | 4.7E-11                               | 2.0E-10                                | 3.8E-11                               | NA                                    |
| Fe-59                      | 1.5E-09                               | 5.1E-09                                | 1.3E-09                               | NA                                    |
| Fe-60 +                    | 1.4E-09                               | 1.1E-08                                | 2.1E-09                               | NA                                    |
| Co-55 +(*)                 | 6.1E-11                               | 8.5E-10                                | 1.3E-09                               | NA                                    |
| Co-56                      | 9.0E-10                               | 1.1E-08                                | 2.4E-09                               | NA                                    |
| Co-57                      | 3.8E-11                               | 1.2E-09                                | 2.3E-10                               | NA                                    |
| Co-58                      | 2.7E-10                               | 3.3E-09                                | 7.1E-10                               | NA                                    |
| Co-58m +                   | 1.5E-12                               | 3.7E-11                                | 3.4E-11                               | NA                                    |
| Co-60                      | 7.2E-10                               | 9.3E-09                                | 1.8E-09                               | NA                                    |
| Ni-59                      | 1.8E-11                               | 2.3E-10                                | 4.7E-11                               | NA                                    |
| Ni-63                      | 4.4E-11                               | 5.7E-10                                | 1.2E-10                               | NA                                    |
| Ni-65 (*)                  | 2.6E-10                               | 1.3E-10                                | 1.2E-10                               | NA                                    |
| Cu-64 (*)                  | 9.1E-12                               | 1.5E-10                                | 1.3E-10                               | NA                                    |
| Cu-67                      | 3.8E-11                               | 8.7E-10                                | 4.2E-10                               | NA                                    |
| Zn-65                      | 1.7E-10                               | 1.6E-09                                | 3.4E-10                               | NA                                    |
| Zn-69 (*)                  | 1.1E-13                               | 2.4E-11                                | 7.5E-12                               | NA                                    |
| Zn-69m +(*)                | 1.7E-11                               | 4.0E-10                                | 6.4E-10                               | NA                                    |
| Ga-67                      | 4.5E-11                               | 3.0E-10                                | 2.5E-10                               | NA                                    |
| Ga-68 (*)                  | 5.6E-12                               | 7.4E-11                                | 3.2E-11                               | NA                                    |
| Ga-72 (*)                  | 1.3E-10                               | 7.3E-10                                | 1.2E-09                               | NA                                    |
| Ge-68 +                    | 2.9E-10                               | 2.6E-08                                | 2.3E-09                               | NA                                    |
| Ge-71                      | 5.9E-13                               | 1.5E-10                                | 2.1E-11                               | NA                                    |
| Ge-77 +                    | 3.5E-11                               | 8.5E-10                                | 2.4E-10                               | NA                                    |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Inhalación                             |   |  |  |
|----------------------------|--|---|--|--|
|                            | Médula roja                            | Región AI                               | Colon                                  | Tiroides                               |
|                            | AF <sub>2,III</sub> R (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>3R,III</sub> R (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>4,III</sub> R (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>5,III</sub> R (Δ) <sup>e</sup> |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                           | ((Gy-Eq)/Bq)                            | ((Gy-Eq)/Bq)                           | ((Gy-Eq)/Bq)                           |
| As-72                      | 9.1E-11                                | 2.3E-09                                 | 2.3E-09                                | NA                                     |
| As-73                      | 1.1E-11                                | 2.1E-09                                 | 3.9E-10                                | NA                                     |
| As-74                      | 1.9E-10                                | 6.5E-09                                 | 1.6E-09                                | NA                                     |
| As-76                      | 3.8E-11                                | 2.2E-09                                 | 2.2E-09                                | NA                                     |
| As-77                      | 6.5E-12                                | 6.9E-10                                 | 5.8E-10                                | NA                                     |
| Se-75                      | 2.3E-10                                | 1.4E-09                                 | 3.1E-10                                | NA                                     |
| Se-79                      | 5.6E-11                                | 1.9E-09                                 | 3.7E-10                                | NA                                     |
| Br-76 (*)                  | 1.1E-10                                | 1.1E-09                                 | 1.4E-10                                | NA                                     |
| Br-77                      | 2.9E-11                                | 1.7E-10                                 | 4.7E-11                                | NA                                     |
| Br-82                      | 1.6E-10                                | 9.2E-10                                 | 2.6E-10                                | NA                                     |
| Kr-81                      | 0.0E+00                                | 0.0E+00                                 | 0.0E+00                                | NA                                     |
| Kr-85                      | 0.0E+00                                | 0.0E+00                                 | 0.0E+00                                | NA                                     |
| Kr-85m                     | 0.0E+00                                | 0.0E+00                                 | 0.0E+00                                | NA                                     |
| Kr-87                      | 0.0E+00                                | 0.0E+00                                 | 0.0E+00                                | NA                                     |
| Rb-81 (*)                  | 1.0E-11                                | 1.2E-11                                 | 9.0E-12                                | NA                                     |
| Rb-83                      | 4.1E-10                                | 2.8E-10                                 | 3.6E-10                                | NA                                     |
| Rb-84                      | 8.4E-10                                | 5.4E-10                                 | 7.4E-10                                | NA                                     |
| Rb-86                      | 1.1E-09                                | 6.0E-10                                 | 1.0E-09                                | NA                                     |
| Rb-87                      | 2.9E-10                                | 1.5E-10                                 | 2.6E-10                                | NA                                     |
| Sr-82                      | 4.3E-09                                | 4.1E-08                                 | 1.0E-08                                | NA                                     |
| Sr-85                      | 2.8E-10                                | 1.7E-09                                 | 3.2E-10                                | NA                                     |
| Sr-85m +                   | 8.5E-13                                | 4.2E-12                                 | 2.2E-12                                | NA                                     |
| Sr-87m (*)                 | 3.9E-12                                | 2.3E-11                                 | 2.3E-11                                | NA                                     |
| Sr-89                      | 1.9E-09                                | 1.9E-08                                 | 4.2E-09                                | NA                                     |
| Sr-90 +                    | 3.7E-09                                | 4.5E-08                                 | 8.4E-09                                | NA                                     |
| Sr-91 +                    | 5.3E-10                                | 1.7E-08                                 | 4.2E-09                                | NA                                     |
| Sr-92 +(*)                 | 6.1E-11                                | 4.1E-10                                 | 6.5E-10                                | NA                                     |
| Y-87 +                     | 8.6E-11                                | 9.1E-10                                 | 6.4E-10                                | NA                                     |
| Y-88                       | 8.7E-10                                | 5.7E-09                                 | 1.2E-09                                | NA                                     |
| Y-90                       | 1.0E-10                                | 5.1E-09                                 | 4.4E-09                                | NA                                     |
| Y-91                       | 5.6E-10                                | 2.0E-08                                 | 4.3E-09                                | NA                                     |
| Y-91m +                    | 1.3E-12                                | 1.7E-11                                 | 5.1E-12                                | NA                                     |
| Y-92 (*)                   | 5.8E-12                                | 4.5E-10                                 | 4.9E-10                                | NA                                     |
| Y-93 (*)                   | 1.6E-11                                | 1.0E-09                                 | 1.6E-09                                | NA                                     |
| Zr-88 +                    | 6.5E-10                                | 2.8E-09                                 | 5.5E-10                                | NA                                     |
| Zr-93 +                    | 1.7E-10                                | 1.3E-09                                 | 2.3E-10                                | NA                                     |
| Zr-95 +                    | 1.7E-09                                | 6.3E-09                                 | 1.2E-09                                | NA                                     |
| Zr-97 +(*)                 | 3.5E-10                                | 1.9E-09                                 | 2.9E-09                                | NA                                     |
| Nb-93m                     | 6.6E-12                                | 1.2E-09                                 | 2.2E-10                                | NA                                     |
| Nb-94                      | 5.7E-10                                | 1.0E-08                                 | 2.0E-09                                | NA                                     |
| Nb-95                      | 2.1E-10                                | 2.8E-09                                 | 6.5E-10                                | NA                                     |
| Nb-97 (*)                  | 1.9E-12                                | 5.4E-11                                 | 2.4E-11                                | NA                                     |
| Mo-93 +                    | 1.8E-11                                | 1.0E-09                                 | 1.5E-10                                | NA                                     |
| Mo-99 +                    | 2.0E-10                                | 2.4E-09                                 | 2.0E-09                                | NA                                     |
| Tc-95m                     | 1.8E-10                                | 1.9E-09                                 | 4.5E-10                                | 3.3E-10                                |
| Tc-96                      | 2.4E-10                                | 1.3E-09                                 | 8.5E-10                                | 6.8E-10                                |
| Tc-96m +                   | 2.0E-12                                | 1.3E-11                                 | 7.7E-12                                | 1.2E-11                                |
| Tc-97                      | 2.1E-12                                | 4.6E-10                                 | 6.8E-11                                | 7.0E-11                                |
| Tc-97m                     | 1.8E-11                                | 2.8E-09                                 | 6.3E-10                                | 5.8E-10                                |
| Tc-98                      | 4.1E-10                                | 8.2E-09                                 | 1.8E-09                                | 1.4E-09                                |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Inhalación                            |  |                                       |                                       |
|----------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                            | Médula roja                           | Región AI                              | Colon                                 | Tiroides                              |
|                            | AF <sub>2,IIIR</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>3R,IIIR</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>4,IIIR</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>5,IIIR</sub> (Δ) <sup>e</sup> |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                          | ((Gy-Eq)/Bq)                           | ((Gy-Eq)/Bq)                          | ((Gy-Eq)/Bq)                          |
| Tc-99                      | 2.1E-11                               | 3.4E-09                                | 7.3E-10                               | 6.5E-10                               |
| Tc-99m (*)                 | 1.7E-12                               | 1.2E-11                                | 7.9E-12                               | 4.0E-11                               |
| Ru-97                      | 3.8E-11                               | 2.2E-10                                | 4.2E-10                               | NA                                    |
| Ru-103 +                   | 4.1E-10                               | 4.5E-09                                | 2.8E-09                               | NA                                    |
| Ru-105 +                   | 2.4E-11                               | 2.4E-10                                | 7.7E-10                               | NA                                    |
| Ru-106 +                   | 2.6E-09                               | 5.5E-08                                | 2.7E-08                               | NA                                    |
| Rh-99                      | 1.6E-10                               | 2.0E-09                                | 5.6E-10                               | NA                                    |
| Rh-101                     | 1.2E-10                               | 2.3E-09                                | 4.0E-10                               | NA                                    |
| Rh-102                     | 7.5E-10                               | 5.9E-09                                | 1.5E-09                               | NA                                    |
| Rh-102m                    | 3.0E-10                               | 7.7E-09                                | 1.5E-09                               | NA                                    |
| Rh-103m (*)                | 9.1E-14                               | 3.2E-12                                | 9.3E-13                               | NA                                    |
| Rh-105                     | 1.7E-11                               | 4.8E-10                                | 5.6E-10                               | NA                                    |
| Pd-103 +                   | 8.3E-12                               | 1.2E-09                                | 3.3E-10                               | NA                                    |
| Pd-107                     | 2.1E-12                               | 3.7E-10                                | 6.9E-11                               | NA                                    |
| Pd-109 (*)                 | 1.7E-12                               | 5.1E-10                                | 8.1E-10                               | NA                                    |
| Ag-105                     | 1.9E-10                               | 1.9E-09                                | 4.8E-10                               | NA                                    |
| Ag-108m                    | 7.5E-10                               | 7.1E-09                                | 1.7E-09                               | NA                                    |
| Ag-110m                    | 1.2E-09                               | 9.5E-09                                | 2.5E-09                               | NA                                    |
| Ag-111                     | 8.6E-11                               | 4.9E-09                                | 2.2E-09                               | NA                                    |
| Cd-109                     | 6.1E-11                               | 3.7E-09                                | 6.4E-10                               | NA                                    |
| Cd-113m                    | 1.2E-10                               | 7.3E-09                                | 1.3E-09                               | NA                                    |
| Cd-115 +                   | 7.3E-11                               | 2.3E-09                                | 2.1E-09                               | NA                                    |
| Cd-115m                    | 3.2E-10                               | 1.9E-08                                | 4.1E-09                               | NA                                    |
| In-111                     | 1.6E-10                               | 3.6E-10                                | 3.0E-10                               | NA                                    |
| In-113m (*)                | 3.2E-12                               | 2.1E-11                                | 1.4E-11                               | NA                                    |
| In-114m                    | 1.5E-08                               | 2.5E-08                                | 6.0E-09                               | NA                                    |
| In-115m (*)                | 1.6E-11                               | 6.6E-11                                | 8.6E-11                               | NA                                    |
| Sn-113 +                   | 3.1E-10                               | 5.1E-09                                | 1.2E-09                               | NA                                    |
| Sn-117m                    | 4.5E-10                               | 3.2E-09                                | 1.1E-09                               | NA                                    |
| Sn-119m                    | 1.2E-10                               | 2.7E-09                                | 5.9E-10                               | NA                                    |
| Sn-121m +                  | 2.0E-10                               | 4.2E-09                                | 9.2E-10                               | NA                                    |
| Sn-123                     | 7.0E-10                               | 1.6E-08                                | 3.7E-09                               | NA                                    |
| Sn-125                     | 1.7E-09                               | 1.2E-08                                | 5.1E-09                               | NA                                    |
| Sn-126 +                   | 3.0E-09                               | 3.8E-08                                | 9.4E-09                               | NA                                    |
| Sb-122                     | 4.1E-10                               | 2.9E-09                                | 2.7E-09                               | NA                                    |
| Sb-124                     | 1.4E-09                               | 1.4E-08                                | 3.4E-09                               | NA                                    |
| Sb-125 +                   | 7.5E-10                               | 6.8E-09                                | 1.5E-09                               | 5.8E-10                               |
| Sb-126                     | 1.1E-09                               | 7.8E-09                                | 2.9E-09                               | NA                                    |
| Te-121                     | 2.7E-10                               | 1.1E-09                                | 5.6E-10                               | 6.7E-10                               |
| Te-121m +                  | 6.8E-10                               | 3.9E-09                                | 1.2E-09                               | 2.4E-09                               |
| Te-123m                    | 5.2E-10                               | 3.5E-09                                | 8.4E-10                               | 2.2E-09                               |
| Te-125m                    | 4.7E-10                               | 3.5E-09                                | 7.8E-10                               | 2.1E-09                               |
| Te-127 (*)                 | 2.6E-11                               | 1.5E-10                                | 2.3E-10                               | 5.9E-11                               |
| Te-127m +                  | 1.3E-09                               | 9.2E-09                                | 2.0E-09                               | 5.8E-09                               |
| Te-129 (*)                 | 3.0E-11                               | 5.1E-11                                | 2.0E-11                               | 7.5E-12                               |
| Te-129m +                  | 2.2E-09                               | 1.6E-08                                | 3.9E-09                               | 1.0E-08                               |
| Te-131m +                  | 2.8E-10                               | 1.5E-09                                | 1.5E-09                               | 1.1E-07                               |
| Te-132 +                   | 5.4E-10                               | 4.5E-09                                | 3.4E-09                               | 7.4E-10                               |
| I-123 (*)                  | 7.4E-12                               | 6.2E-12                                | 7.2E-12                               | 4.6E-08                               |
| I-124                      | 1.4E-10                               | 1.3E-10                                | 7.8E-11                               | 2.4E-08                               |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Inhalación                            |  |                                       |                                       |
|----------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                            | Médula roja                           | Región AI                              | Colon                                 | Tiroides                              |
|                            | AF <sub>2,IIIR</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>3R,IIIR</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>4,IIIR</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>5,IIIR</sub> (Δ) <sup>e</sup> |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                          | ((Gy-Eq)/Bq)                           | ((Gy-Eq)/Bq)                          | ((Gy-Eq)/Bq)                          |
| I-125                      | 1.5E-11                               | 1.2E-11                                | 1.5E-11                               | 8.8E-08                               |
| I-126                      | 1.3E-10                               | 1.3E-10                                | 7.2E-11                               | 6.6E-08                               |
| I-129                      | 2.1E-11                               | 1.9E-11                                | 3.3E-11                               | 7.4E-10                               |
| I-131                      | 9.1E-11                               | 8.8E-11                                | 6.1E-11                               | 7.4E-08                               |
| I-132 (*)                  | 3.1E-11                               | 2.7E-11                                | 3.0E-11                               | 3.6E-09                               |
| I-133 (*)                  | 4.5E-11                               | 4.4E-11                                | 5.3E-11                               | 7.6E-08                               |
| I-134 (*)                  | 1.9E-11                               | 1.5E-11                                | 1.4E-11                               | 7.0E-10                               |
| I-135 (*)                  | 2.7E-11                               | 2.8E-11                                | 3.0E-11                               | 1.3E-08                               |
| Xe-122                     | 0.0E+00                               | 0.0E+00                                | 0.0E+00                               | NA                                    |
| Xe-123 +                   | 8.3E-13                               | 6.9E-13                                | 8.0E-13                               | 4.1E-10                               |
| Xe-127                     | 0.0E+00                               | 0.0E+00                                | 0.0E+00                               | NA                                    |
| Xe-131m                    | 0.0E+00                               | 0.0E+00                                | 0.0E+00                               | NA                                    |
| Xe-133                     | 0.0E+00                               | 0.0E+00                                | 0.0E+00                               | NA                                    |
| Xe-135                     | 0.0E+00                               | 0.0E+00                                | 0.0E+00                               | NA                                    |
| Cs-129                     | 1.8E-11                               | 1.9E-11                                | 2.1E-11                               | NA                                    |
| Cs-131                     | 1.2E-11                               | 2.0E-11                                | 2.0E-11                               | NA                                    |
| Cs-132                     | 1.6E-10                               | 1.5E-10                                | 1.8E-10                               | NA                                    |
| Cs-134                     | 1.3E-09                               | 1.2E-09                                | 1.5E-09                               | NA                                    |
| Cs-134m +                  | 1.5E-12                               | 3.2E-12                                | 1.9E-12                               | NA                                    |
| Cs-135                     | 1.1E-10                               | 1.2E-10                                | 1.5E-10                               | NA                                    |
| Cs-136                     | 8.3E-10                               | 7.9E-10                                | 9.7E-10                               | NA                                    |
| Cs-137 +                   | 7.9E-10                               | 7.6E-10                                | 9.7E-10                               | NA                                    |
| Ba-131 +                   | 1.6E-10                               | 3.0E-11                                | 6.7E-10                               | NA                                    |
| Ba-133                     | 2.5E-10                               | 4.0E-11                                | 8.2E-10                               | NA                                    |
| Ba-133m                    | 8.7E-11                               | 8.6E-12                                | 1.0E-09                               | NA                                    |
| Ba-140 +                   | 1.3E-09                               | 1.6E-09                                | 6.2E-09                               | NA                                    |
| La-137                     | 4.5E-11                               | 4.5E-10                                | 8.6E-11                               | NA                                    |
| La-140                     | 3.0E-10                               | 2.1E-09                                | 2.5E-09                               | NA                                    |
| Ce-139                     | 8.0E-11                               | 1.9E-09                                | 3.7E-10                               | NA                                    |
| Ce-141                     | 1.1E-10                               | 5.2E-09                                | 1.2E-09                               | NA                                    |
| Ce-143 +                   | 4.0E-11                               | 1.9E-09                                | 1.7E-09                               | NA                                    |
| Ce-144 +                   | 8.9E-10                               | 5.0E-08                                | 9.7E-09                               | NA                                    |
| Pr-142 (*)                 | 1.3E-11                               | 1.3E-09                                | 2.0E-09                               | NA                                    |
| Pr-143                     | 8.3E-11                               | 6.5E-09                                | 2.1E-09                               | NA                                    |
| Nd-147 +                   | 1.4E-10                               | 5.2E-09                                | 1.8E-09                               | NA                                    |
| Nd-149 +                   | 2.9E-12                               | 1.4E-10                                | 1.1E-10                               | NA                                    |
| Pm-143                     | 1.3E-10                               | 1.3E-09                                | 2.4E-10                               | NA                                    |
| Pm-144                     | 6.3E-10                               | 4.6E-09                                | 9.5E-10                               | NA                                    |
| Pm-145                     | 2.7E-11                               | 8.3E-10                                | 1.5E-10                               | NA                                    |
| Pm-147                     | 6.0E-11                               | 2.4E-09                                | 4.6E-10                               | NA                                    |
| Pm-148m                    | 8.0E-10                               | 1.0E-08                                | 2.2E-09                               | NA                                    |
| Pm-149                     | 3.0E-11                               | 1.7E-09                                | 1.6E-09                               | NA                                    |
| Pm-151                     | 2.7E-11                               | 8.1E-10                                | 1.1E-09                               | NA                                    |
| Sm-145 +                   | 5.8E-11                               | 1.5E-09                                | 3.1E-10                               | NA                                    |
| Sm-147 (*)                 | 4.4E-09                               | 5.3E-07                                | 0.0E+00                               | NA                                    |
| Sm-151                     | 2.0E-11                               | 6.6E-10                                | 1.4E-10                               | NA                                    |
| Sm-153                     | 2.3E-11                               | 1.0E-09                                | 1.1E-09                               | NA                                    |
| Eu-147                     | 1.6E-10                               | 1.8E-09                                | 5.3E-10                               | NA                                    |
| Eu-148                     | 7.2E-10                               | 4.6E-09                                | 1.2E-09                               | NA                                    |
| Eu-149                     | 3.2E-11                               | 6.1E-10                                | 1.4E-10                               | NA                                    |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Inhalación   |   |  |  |
|----------------------------|--|---|--|--|
|                            | Médula roja  | Región AI   | Colon  | Tiroides   |
|                            | AF <sub>2,III</sub> (Δ) <sup>b</sup><br>((Gy-Eq)/Bq) | AF <sub>3R,III</sub> (Δ) <sup>c</sup><br>((Gy-Eq)/Bq) | AF <sub>4,III</sub> (Δ) <sup>d</sup><br>((Gy-Eq)/Bq) | AF <sub>5,III</sub> (Δ) <sup>e</sup><br>((Gy-Eq)/Bq) |
| Eu-150b                    | 6.2E-10  | 4.8E-09   | 1.1E-09  | NA   |
| Eu-150a (*)                | 5.1E-12  | 3.1E-10   | 5.2E-10  | NA   |
| Eu-152                     | 5.4E-10  | 7.1E-09   | 1.6E-09  | NA   |
| Eu-152m                    | 9.8E-12  | 3.9E-10   | 6.4E-10  | NA   |
| Eu-154                     | 7.0E-10  | 1.2E-08   | 2.7E-09  | NA   |
| Eu-155                     | 8.0E-11  | 2.3E-09   | 4.9E-10  | NA   |
| Eu-156                     | 4.6E-10  | 9.4E-09   | 3.2E-09  | NA   |
| Gd-146 +                   | 2.6E-09  | 8.9E-09   | 2.1E-09  | NA   |
| Gd-148 (*)                 | 4.7E-08  | 7.7E-07   | 0.0E+00  | NA   |
| Gd-153                     | 4.3E-10  | 1.9E-09   | 4.1E-10  | NA   |
| Gd-159 (*)                 | 7.0E-11  | 4.4E-10   | 7.2E-10  | NA   |
| Tb-157                     | 8.0E-12  | 2.2E-10   | 4.7E-11  | NA   |
| Tb-158                     | 4.4E-10  | 5.7E-09   | 1.3E-09  | NA   |
| Tb-160                     | 6.2E-10  | 9.5E-09   | 2.3E-09  | NA   |
| Dy-159                     | 3.6E-11  | 6.5E-10   | 1.4E-10  | NA   |
| Dy-165 (*)                 | 9.0E-13  | 8.3E-11   | 7.1E-11  | NA   |
| Dy-166 +                   | 1.6E-10  | 5.2E-09   | 3.1E-09  | NA   |
| Ho-166                     | 2.4E-11  | 1.4E-09   | 2.1E-09  | NA   |
| Ho-166m                    | 7.9E-10  | 8.2E-09   | 1.8E-09  | NA   |
| Er-169                     | 5.0E-11  | 1.5E-09   | 6.3E-10  | NA   |
| Er-171                     | 1.0E-11  | 2.7E-10   | 4.3E-10  | NA   |
| Tm-167                     | 9.7E-11  | 2.0E-09   | 8.6E-10  | NA   |
| Tm-170                     | 4.4E-10  | 1.0E-08   | 2.3E-09  | NA   |
| Tm-171                     | 3.7E-11  | 8.4E-10   | 1.8E-10  | NA   |
| Yb-169                     | 2.0E-10  | 4.5E-09   | 1.1E-09  | NA   |
| Yb-175                     | 2.8E-11  | 1.1E-09   | 7.2E-10  | NA   |
| Lu-172                     | 3.2E-10  | 3.0E-09   | 1.4E-09  | NA   |
| Lu-173                     | 1.1E-10  | 2.0E-09   | 3.7E-10  | NA   |
| Lu-174                     | 1.1E-10  | 2.1E-09   | 4.0E-10  | NA   |
| Lu-174m +                  | 1.7E-10  | 4.7E-09   | 9.2E-10  | NA   |
| Lu-177 (*)                 | 5.7E-11  | 1.8E-09   | 9.7E-10  | NA   |
| Hf-172 +                   | 3.2E-09  | 1.2E-08   | 2.8E-09  | NA   |
| Hf-175                     | 6.6E-10  | 2.1E-09   | 5.3E-10  | NA   |
| Hf-181                     | 1.8E-09  | 6.4E-09   | 1.7E-09  | NA   |
| Hf-182 +                   | 1.6E-09  | 1.5E-08   | 3.0E-09  | NA   |
| Ta-178a (*)                | 5.1E-12  | 4.6E-11   | 4.1E-11  | NA   |
| Ta-179                     | 1.4E-11  | 5.1E-10   | 9.4E-11  | NA   |
| Ta-182                     | 4.4E-10  | 1.1E-08   | 2.2E-09  | NA   |
| W-178                      | 1.3E-11  | 5.2E-12   | 3.3E-10  | NA   |
| W-181                      | 5.3E-12  | 2.1E-12   | 1.0E-10  | NA   |
| W-185                      | 1.4E-11  | 4.3E-12   | 8.0E-10  | NA   |
| W-187 (*)                  | 2.4E-11  | 1.6E-11   | 9.2E-10  | NA   |
| W-188 +                    | 1.2E-10  | 9.6E-10   | 4.5E-09  | 2.7E-09  |
| Re-184                     | 2.3E-10  | 3.0E-09   | 6.7E-10  | 6.3E-10  |
| Re-184m +                  | 2.3E-10  | 6.2E-09   | 1.1E-09  | 1.1E-09  |
| Re-186                     | 4.0E-11  | 2.3E-09   | 1.1E-09  | 1.9E-09  |
| Re-187                     | 1.4E-13  | 2.2E-11   | 3.9E-12  | 4.2E-12  |
| Re-188 (*)                 | 3.3E-11  | 1.0E-09   | 6.7E-10  | 2.8E-09  |
| Re-189                     | 2.1E-11  | 6.7E-10   | 4.4E-10  | 1.4E-09  |
| Os-185                     | 2.7E-10  | 2.4E-09   | 5.6E-10  | NA   |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Inhalación                            |  |                                       |                                       |
|----------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                            | Médula roja                           | Región AI                              | Colon                                 | Tiroides                              |
|                            | AF <sub>2,IIIR</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>3R,IIIR</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>4,IIIR</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>5,IIIR</sub> (Δ) <sup>e</sup> |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                          | ((Gy-Eq)/Bq)                           | ((Gy-Eq)/Bq)                          | ((Gy-Eq)/Bq)                          |
| Os-191                     | 7.3E-11                               | 3.2E-09                                | 9.5E-10                               | NA                                    |
| Os-191m +                  | 4.4E-12                               | 1.9E-10                                | 1.5E-10                               | NA                                    |
| Os-193                     | 2.4E-11                               | 9.8E-10                                | 1.3E-09                               | NA                                    |
| Os-194 +                   | 6.2E-10                               | 3.4E-08                                | 6.3E-09                               | NA                                    |
| Ir-189                     | 3.8E-11                               | 1.3E-09                                | 3.9E-10                               | NA                                    |
| Ir-190                     | 3.6E-10                               | 4.4E-09                                | 1.5E-09                               | NA                                    |
| Ir-192                     | 4.3E-10                               | 9.4E-09                                | 2.0E-09                               | NA                                    |
| Ir-194 (*)                 | 3.3E-11                               | 1.4E-09                                | 2.0E-09                               | NA                                    |
| Pt-188 +                   | 2.2E-10                               | 5.1E-10                                | 1.2E-09                               | NA                                    |
| Pt-191                     | 3.1E-11                               | 2.7E-11                                | 3.1E-10                               | NA                                    |
| Pt-193                     | 2.8E-12                               | 3.4E-12                                | 5.3E-11                               | NA                                    |
| Pt-193m                    | 2.0E-11                               | 2.2E-11                                | 5.6E-10                               | NA                                    |
| Pt-195m                    | 3.1E-11                               | 3.4E-11                                | 7.6E-10                               | NA                                    |
| Pt-197 (*)                 | 9.8E-12                               | 1.3E-11                                | 3.9E-10                               | NA                                    |
| Pt-197m +(*)               | 2.3E-12                               | 6.7E-12                                | 5.1E-11                               | NA                                    |
| Au-193                     | 7.2E-12                               | 1.3E-10                                | 1.7E-10                               | NA                                    |
| Au-194                     | 5.4E-11                               | 3.8E-10                                | 3.9E-10                               | NA                                    |
| Au-195                     | 2.7E-11                               | 2.4E-09                                | 4.0E-10                               | NA                                    |
| Au-198                     | 5.7E-11                               | 2.0E-09                                | 1.5E-09                               | NA                                    |
| Au-199                     | 2.1E-11                               | 9.6E-10                                | 6.8E-10                               | NA                                    |
| Hg-194 +                   | 2.3E-09                               | 4.0E-09                                | 2.7E-09                               | NA                                    |
| Hg-195m +                  | 1.5E-09                               | 1.2E-09                                | 7.9E-10                               | NA                                    |
| Hg-197                     | 6.7E-10                               | 3.8E-10                                | 3.3E-10                               | NA                                    |
| Hg-197m +                  | 1.2E-09                               | 5.5E-10                                | 6.8E-10                               | NA                                    |
| Hg-203                     | 1.9E-09                               | 3.1E-09                                | 8.4E-10                               | NA                                    |
| Tl-200                     | 5.8E-11                               | 5.5E-11                                | 9.0E-11                               | NA                                    |
| Tl-201                     | 2.0E-11                               | 2.2E-11                                | 7.3E-11                               | NA                                    |
| Tl-202                     | 1.2E-10                               | 1.1E-10                                | 2.7E-10                               | NA                                    |
| Tl-204                     | 2.0E-10                               | 2.0E-10                                | 1.3E-09                               | NA                                    |
| Pb-201 +                   | 2.4E-11                               | 1.6E-11                                | 8.2E-11                               | NA                                    |
| Pb-202 +                   | 3.6E-10                               | 2.4E-10                                | 4.4E-10                               | NA                                    |
| Pb-203                     | 4.8E-11                               | 2.8E-11                                | 1.6E-10                               | NA                                    |
| Pb-205                     | 2.6E-11                               | 6.0E-12                                | 3.0E-11                               | NA                                    |
| Pb-210 +                   | 6.0E-08                               | 1.2E-06                                | 2.8E-09                               | NA                                    |
| Pb-212 +(*)                | 1.1E-09                               | 4.6E-09                                | 0.0E+00                               | NA                                    |
| Bi-205                     | 2.8E-10                               | 2.5E-09                                | 8.7E-10                               | NA                                    |
| Bi-206                     | 3.8E-10                               | 3.6E-09                                | 1.9E-09                               | NA                                    |
| Bi-207                     | 4.2E-10                               | 7.1E-09                                | 1.6E-09                               | NA                                    |
| Bi-210 +                   | 1.8E-09                               | 4.0E-08                                | 2.1E-09                               | NA                                    |
| Bi-210m                    | 5.7E-10                               | 1.2E-06                                | 4.5E-09                               | NA                                    |
| Bi-212 +(*)                | 1.8E-11                               | 4.6E-09                                | 0.0E+00                               | NA                                    |
| Po-210                     | 5.7E-08                               | 1.2E-06                                | 6.4E-15                               | NA                                    |
| At-211                     | 3.8E-10                               | 2.8E-08                                | 1.1E-12                               | NA                                    |
| Rn-222                     | 0.0E+00                               | 0.0E+00                                | 0.0E+00                               | NA                                    |
| Ra-223 +                   | 7.4E-09                               | 3.0E-06                                | 7.1E-09                               | NA                                    |
| Ra-224 +                   | 4.3E-09                               | 1.2E-06                                | 3.9E-09                               | NA                                    |
| Ra-225 +                   | 5.7E-08                               | 2.8E-06                                | 2.6E-09                               | NA                                    |
| Ra-226                     | 2.2E-09                               | 1.1E-06                                | 1.7E-09                               | NA                                    |
| Ra-228 +                   | 4.6E-08                               | 8.4E-06                                | 1.1E-08                               | NA                                    |
| Ac-225                     | 1.2E-07                               | 3.4E-06                                | 4.3E-09                               | NA                                    |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Inhalación                            |  |                                       |                                       |
|----------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                            | Médula roja                           | Región AI                              | Colon                                 | Tiroides                              |
|                            | AF <sub>2,IIIR</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>3R,IIIR</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>4,IIIR</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>5,IIIR</sub> (Δ) <sup>e</sup> |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                          | ((Gy-Eq)/Bq)                           | ((Gy-Eq)/Bq)                          | ((Gy-Eq)/Bq)                          |
| Ac-227 +                   | 6.5E-08                               | 8.5E-06                                | 1.0E-08                               | NA                                    |
| Ac-228                     | 9.9E-11                               | 2.9E-09                                | 4.2E-10                               | NA                                    |
| Th-227 +                   | 1.8E-08                               | 3.8E-06                                | 4.2E-09                               | NA                                    |
| Th-228 +                   | 4.4E-08                               | 8.1E-06                                | 6.5E-09                               | NA                                    |
| Th-229 +                   | 1.5E-07                               | 8.7E-06                                | 6.9E-09                               | NA                                    |
| Th-230 +                   | 1.4E-08                               | 1.3E-06                                | 1.2E-10                               | NA                                    |
| Th-231                     | 7.5E-12                               | 3.9E-10                                | 5.2E-10                               | NA                                    |
| Th-232 +                   | 4.4E-08                               | 7.0E-06                                | 7.8E-09                               | NA                                    |
| Th-234 +                   | 8.4E-10                               | 2.4E-08                                | 6.1E-09                               | NA                                    |
| Pa-230 +                   | 2.2E-09                               | 2.9E-07                                | 7.5E-10                               | NA                                    |
| Pa-231 +                   | 3.3E-08                               | 3.8E-06                                | 3.3E-09                               | NA                                    |
| Pa-233                     | 2.6E-10                               | 6.0E-09                                | 1.5E-09                               | NA                                    |
| U-230 +                    | 5.2E-08                               | 6.1E-06                                | 3.1E-10                               | NA                                    |
| U-232 +                    | 5.1E-08                               | 8.9E-06                                | 6.2E-09                               | NA                                    |
| U-233                      | 1.0E-08                               | 1.4E-06                                | 4.9E-11                               | NA                                    |
| U-234 +                    | 1.0E-08                               | 1.3E-06                                | 1.0E-10                               | NA                                    |
| U-235 +                    | 9.6E-09                               | 1.3E-06                                | 1.7E-09                               | NA                                    |
| U-236                      | 9.4E-09                               | 1.3E-06                                | 8.8E-11                               | NA                                    |
| U-238 +                    | 1.0E-08                               | 1.2E-06                                | 6.7E-09                               | NA                                    |
| Empobrecido U              | 9.3E-09                               | 1.2E-06                                | 5.5E-10                               | NA                                    |
| Np-235                     | 1.3E-11                               | 5.2E-10                                | 8.7E-11                               | NA                                    |
| Np-236b +                  | 1.2E-09                               | 1.3E-07                                | 2.6E-10                               | NA                                    |
| Np-236a                    | 2.9E-10                               | 8.9E-09                                | 1.6E-09                               | NA                                    |
| Np-237 +                   | 1.1E-08                               | 1.2E-06                                | 2.1E-09                               | NA                                    |
| Np-239                     | 3.4E-11                               | 1.2E-09                                | 1.2E-09                               | NA                                    |
| Pu-236                     | 1.4E-08                               | 1.6E-06                                | 1.1E-10                               | NA                                    |
| Pu-237                     | 3.3E-11                               | 8.7E-10                                | 1.5E-10                               | NA                                    |
| Pu-238                     | 1.4E-08                               | 1.6E-06                                | 8.3E-11                               | NA                                    |
| Pu-239                     | 1.3E-08                               | 1.5E-06                                | 5.2E-11                               | NA                                    |
| Pu-240                     | 1.3E-08                               | 1.5E-06                                | 8.3E-11                               | NA                                    |
| Pu-241 +                   | 9.9E-11                               | 1.7E-08                                | 3.9E-11                               | NA                                    |
| Pu-242                     | 1.2E-08                               | 1.4E-06                                | 6.8E-11                               | NA                                    |
| Pu-244 +                   | 1.3E-08                               | 1.3E-06                                | 6.4E-09                               | NA                                    |
| Am-241                     | 7.4E-09                               | 1.3E-06                                | 4.1E-10                               | NA                                    |
| Am-242m +                  | 7.0E-09                               | 1.2E-06                                | 1.7E-09                               | NA                                    |
| Am-243 +                   | 7.4E-09                               | 1.3E-06                                | 2.1E-09                               | NA                                    |
| Am-244                     | 1.9E-11                               | 4.1E-10                                | 5.4E-10                               | NA                                    |
| Cm-240                     | 5.7E-09                               | 1.1E-06                                | 7.5E-11                               | NA                                    |
| Cm-241 +                   | 2.7E-10                               | 1.5E-08                                | 1.2E-09                               | NA                                    |
| Cm-242                     | 7.7E-09                               | 1.4E-06                                | 7.0E-11                               | NA                                    |
| Cm-243                     | 8.0E-09                               | 1.4E-06                                | 1.1E-09                               | NA                                    |
| Cm-244                     | 7.8E-09                               | 1.4E-06                                | 6.4E-11                               | NA                                    |
| Cm-245                     | 7.3E-09                               | 1.3E-06                                | 5.3E-10                               | NA                                    |
| Cm-246                     | 7.3E-09                               | 1.3E-06                                | 5.9E-11                               | NA                                    |
| Cm-247                     | 6.9E-09                               | 1.2E-06                                | 1.5E-09                               | NA                                    |
| Cm-248 (*)                 | 2.7E-08                               | 4.6E-06                                | ND                                    | NA                                    |
| Bk-247                     | 1.6E-08                               | 1.3E-06                                | 5.0E-10                               | NA                                    |
| Bk-249                     | 4.7E-11                               | 1.2E-09                                | 2.3E-10                               | NA                                    |
| Cf-248 +                   | 1.7E-08                               | 1.4E-06                                | 4.5E-11                               | NA                                    |
| Cf-249                     | 1.7E-08                               | 1.4E-06                                | 5.0E-10                               | NA                                    |

| Radionucleido <sup>a</sup>                         | Inhalación                            |  |                                       |                                       |
|--|---------------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
|  | Médula roja                           | Región AI                              | Colon                                 | Tiroides                              |
|  | AF <sub>2,IIIR</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>3R,IIIR</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>4,IIIR</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>5,IIIR</sub> (Δ) <sup>e</sup> |
|  | ((Gy-Eq)/Bq)                          | ((Gy-Eq)/Bq)                           | ((Gy-Eq)/Bq)                          | ((Gy-Eq)/Bq)                          |
| Cf-250 <sup>g</sup>                                | 1.7E-08                               | 1.4E-06                                | 4.3E-11                               | NA                                    |
| Cf-251   | 1.7E-08                               | 1.4E-06                                | 1.5E-09                               | NA                                    |
| Cf-252 (*)   | 3.3E-08                               | 2.5E-06                                | ND                                    | NA                                    |
| Cf-253   | 5.1E-09                               | 3.9E-07                                | 5.2E-10                               | NA                                    |
| Cf-254 (*)   | 1.1E-06                               | 2.5E-05                                | 1.2E-07                               | NA                                    |
| <sup>239</sup> Pu/ <sup>9</sup> Be <sup>g, h</sup> | 1.3E-08                               | 1.5E-06                                | 5.2E-11                               | NA                                    |
| <sup>241</sup> Am/ <sup>9</sup> Be <sup>g, h</sup> | 7.4E-09                               | 1.3E-06                                | 4.1E-10                               | NA                                    |

<sup>a</sup> Al calcular los valores D para todos los radionucleidos se tuvo en cuenta el aumento interno de la progenie radiactiva, como se señala en el Apéndice VIII. El símbolo '+' indica los radionucleidos en cuyo caso la progenie fue una fuente significativa de dosis en los escenarios considerados. Los factores se basan en datos de la Ref. [49] excepto cuando se indica mediante un "\*" que se basan en datos de [50].

<sup>b</sup> Dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días (Δ) en la médula roja por inhalación del radionucleido.

<sup>c</sup> Dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días (Δ) en la región AI del tracto respiratorio por inhalación del radionucleido.

<sup>d</sup> Dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días (Δ) en el colon por inhalación del radionucleido.

<sup>e</sup> Dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 365 días en la tiroides por inhalación del radionucleido.

<sup>f</sup> "NA" significa "no aplicable".

<sup>g</sup> La actividad dada es la de un radionucleido emisor alfa, p. ej. el <sup>239</sup>Pu o el <sup>241</sup>Am.

<sup>h</sup> Como se explica en la Sección 5, no se tuvo en cuenta la dosis debida a los neutrones.

CUADRO 19. FACTORES DE CONVERSIÓN DE DOSIS PONDERADA SEGÚN EBR COMPROMETIDA POR INGESTIÓN Y DE DOSIS PONDERADA SEGÚN EBR POR CONTAMINACIÓN

| Radionucleido <sup>a</sup> | Ingestión                           |                                     |                                     | Contaminación                     |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|                            | Médula roja                         | Colon                               | Tiroides                            | Dermis                            |
|                            | AF <sub>2,IV</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>4,IV</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>5,IV</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>6R,V</sub> <sup>e</sup>   |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/(sxBq/cm <sup>2</sup> )) |
| H-3                        | 2.1E-11                             | 2.2E-11                             | NA <sup>f</sup>                     | 0.0E+00                           |
| Be-7                       | 1.1E-11                             | 9.6E-11                             | NA                                  | 7.1E-13                           |
| Be-10                      | 1.1E-11                             | 8.1E-09                             | NA                                  | 1.7E-10                           |
| C-11                       | 1.8E-12                             | 3.4E-12                             | NA                                  | 1.4E-11                           |
| C-14                       | 2.3E-10                             | 2.5E-10                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| N-13                       | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| F-18 (*)                   | 6.5E-11                             | 1.5E-11                             | NA                                  | 1.8E-10                           |
| Na-22                      | 3.5E-09                             | 2.6E-09                             | NA                                  | 9.0E-11                           |
| Na-24 (*)                  | 3.9E-10                             | 4.0E-10                             | NA                                  | 3.6E-10                           |
| Mg-28 (*)                  | 9.7E-10                             | 1.2E-08                             | NA                                  | 5.3E-10                           |
| Al-26                      | 6.6E-10                             | 1.9E-08                             | NA                                  | 3.4E-10                           |
| Si-31 (*)                  | 8.4E-14                             | 6.5E-10                             | NA                                  | 3.3E-10                           |
| Si-32 +                    | 6.4E-09                             | 9.1E-09                             | NA                                  | 3.6E-10                           |
| P-32                       | 6.4E-09                             | 5.5E-09                             | NA                                  | 3.6E-10                           |
| P-33                       | 3.2E-10                             | 6.5E-10                             | NA                                  | 1.3E-12                           |
| S-35                       | 2.4E-10                             | 2.8E-10                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Cl-36                      | 7.1E-10                             | 8.7E-10                             | NA                                  | 2.1E-10                           |
| Cl-38 (*)                  | 8.1E-12                             | 1.5E-11                             | NA                                  | 4.3E-10                           |
| Ar-37(*)                   | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Ar-39 (*)                  | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Ar-41 (*)                  | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| K-40                       | 2.5E-09                             | 6.8E-09                             | NA                                  | 2.7E-10                           |
| K-42 (*)                   | 2.1E-10                             | 4.5E-10                             | NA                                  | 4.5E-10                           |
| K-43 (*)                   | 1.8E-10                             | 3.1E-10                             | NA                                  | 2.1E-10                           |
| Ca-41                      | 1.8E-11                             | 7.0E-11                             | NA                                  | 1.0E-12                           |
| Ca-45                      | 4.7E-10                             | 1.9E-09                             | NA                                  | 1.8E-12                           |
| Ca-47 +                    | 1.1E-09                             | 8.9E-09                             | NA                                  | 4.6E-10                           |
| Sc-44 (*)                  | 4.7E-11                             | 1.6E-09                             | NA                                  | 4.1E-10                           |
| Sc-46                      | 3.8E-10                             | 7.2E-09                             | NA                                  | 4.2E-11                           |
| Sc-47                      | 1.9E-11                             | 4.1E-09                             | NA                                  | 7.4E-11                           |
| Sc-48                      | 4.1E-10                             | 8.5E-09                             | NA                                  | 1.7E-10                           |
| Ti-44 +                    | 5.4E-10                             | 2.4E-08                             | NA                                  | 4.1E-10                           |
| V-48                       | 5.5E-10                             | 9.5E-09                             | NA                                  | 1.6E-10                           |
| V-49                       | 2.2E-13                             | 1.4E-10                             | NA                                  | 2.7E-12                           |
| Cr-51                      | 9.6E-12                             | 2.0E-10                             | NA                                  | 3.9E-12                           |
| Mn-52                      | 8.0E-10                             | 6.9E-09                             | NA                                  | 7.9E-11                           |
| Mn-53                      | 1.1E-11                             | 1.6E-10                             | NA                                  | ND <sup>f</sup>                   |
| Mn-54                      | 3.6E-10                             | 1.7E-09                             | NA                                  | 1.3E-11                           |
| Mn-56 (*)                  | 2.4E-11                             | 1.0E-09                             | NA                                  | 3.6E-10                           |
| Fe-52 +                    | 3.8E-10                             | 8.4E-09                             | NA                                  | 6.5E-10                           |
| Fe-55                      | 1.8E-11                             | 1.7E-10                             | NA                                  | 4.1E-12                           |
| Fe-59                      | 7.7E-10                             | 5.5E-09                             | NA                                  | 4.5E-11                           |
| Fe-60 +                    | 7.7E-10                             | 8.3E-09                             | NA                                  | 3.4E-11                           |
| Co-55 +(*)                 | 1.6E-10                             | 6.2E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Co-56                      | 7.8E-10                             | 9.3E-09                             | NA                                  | 1.1E-10                           |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Ingestión                           |                                     |                                     | Contaminación                     |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|                            | Médula roja                         | Colon                               | Tiroides                            | Dermis                            |
|                            | AF <sub>2,IV</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>4,IV</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>5,IV</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>6R,V</sub> <sup>e</sup>   |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/(sxBq/cm <sup>2</sup> )) |
| Co-57                      | 3.5E-11                             | 9.0E-10                             | NA                                  | 1.1E-11                           |
| Co-58                      | 2.4E-10                             | 2.8E-09                             | NA                                  | 1.9E-11                           |
| Co-58m +                   | 1.3E-12                             | 1.6E-10                             | NA                                  | 2.3E-11                           |
| Co-60                      | 5.8E-10                             | 7.0E-09                             | NA                                  | 3.4E-11                           |
| Ni-59                      | 6.4E-13                             | 2.1E-10                             | NA                                  | 4.7E-12                           |
| Ni-63                      | 1.6E-12                             | 5.3E-10                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Ni-65 (*)                  | 7.1E-12                             | 6.8E-10                             | NA                                  | 3.0E-10                           |
| Cu-64 (*)                  | 1.9E-11                             | 6.8E-10                             | NA                                  | 1.5E-10                           |
| Cu-67                      | 7.0E-11                             | 2.0E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Zn-65                      | 7.3E-10                             | 1.3E-09                             | NA                                  | 1.0E-11                           |
| Zn-69 (*)                  | 5.6E-13                             | 3.9E-11                             | NA                                  | 2.1E-10                           |
| Zn-69m +(*)                | 9.6E-11                             | 2.0E-09                             | NA                                  | 2.4E-10                           |
| Ga-67                      | 2.6E-11                             | 1.2E-09                             | NA                                  | 9.2E-12                           |
| Ga-68 (*)                  | 5.8E-12                             | 2.0E-10                             | NA                                  | 3.9E-10                           |
| Ga-72 (*)                  | 1.7E-10                             | 6.3E-09                             | NA                                  | 2.7E-10                           |
| Ge-68 +                    | 2.9E-10                             | 7.0E-09                             | NA                                  | 4.0E-10                           |
| Ge-71                      | 1.7E-12                             | 6.2E-11                             | NA                                  | 4.8E-12                           |
| Ge-77 +                    | 9.1E-11                             | 7.5E-10                             | NA                                  | 4.8E-10                           |
| As-72                      | 2.5E-10                             | 1.1E-08                             | NA                                  | ND                                |
| As-73                      | 3.5E-11                             | 1.7E-09                             | NA                                  | 1.0E-11                           |
| As-74                      | 3.3E-10                             | 7.0E-09                             | NA                                  | 2.0E-10                           |
| As-76                      | 1.3E-10                             | 1.1E-08                             | NA                                  | 4.0E-10                           |
| As-77                      | 2.5E-11                             | 2.8E-09                             | NA                                  | 1.4E-10                           |
| Se-75                      | 5.8E-10                             | 9.7E-10                             | NA                                  | 1.3E-11                           |
| Se-79                      | 1.4E-10                             | 6.6E-10                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Br-76 (*)                  | 2.9E-10                             | 6.5E-10                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Br-77                      | 7.8E-11                             | 1.5E-10                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Br-82                      | 4.3E-10                             | 8.1E-10                             | NA                                  | 7.8E-11                           |
| Kr-81                      | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Kr-85                      | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Kr-85m                     | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Kr-87                      | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Rb-81 (*)                  | 2.6E-11                             | 3.4E-11                             | NA                                  | ND                                |
| Rb-83                      | 1.2E-09                             | 1.1E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Rb-84                      | 2.5E-09                             | 2.2E-09                             | NA                                  | 1.1E-10                           |
| Rb-86                      | 3.3E-09                             | 3.1E-09                             | NA                                  | 3.3E-10                           |
| Rb-87                      | 8.6E-10                             | 7.9E-10                             | NA                                  | 3.0E-12                           |
| Sr-82                      | 4.8E-09                             | 3.5E-08                             | NA                                  | 3.9E-12                           |
| Sr-85                      | 3.7E-10                             | 1.1E-09                             | NA                                  | 1.3E-11                           |
| Sr-85m +                   | 1.6E-12                             | 1.1E-11                             | NA                                  | 2.0E-11                           |
| Sr-87m (*)                 | 6.2E-12                             | 1.2E-10                             | NA                                  | 6.4E-11                           |
| Sr-89                      | 2.0E-09                             | 1.4E-08                             | NA                                  | 3.2E-10                           |
| Sr-90 +                    | 4.0E-09                             | 3.3E-08                             | NA                                  | 5.0E-10                           |
| Sr-91 +                    | 1.3E-10                             | 1.8E-08                             | NA                                  | 3.2E-10                           |
| Sr-92 +(*)                 | 6.4E-11                             | 3.4E-09                             | NA                                  | 5.5E-10                           |
| Y-87 +                     | 1.2E-10                             | 3.0E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Y-88                       | 4.7E-10                             | 4.7E-09                             | NA                                  | 2.7E-11                           |
| Y-90                       | 3.7E-13                             | 2.1E-08                             | NA                                  | 3.9E-10                           |
| Y-91                       | 2.4E-12                             | 1.9E-08                             | NA                                  | 3.2E-10                           |
| Y-91m +                    | 2.3E-12                             | 2.7E-11                             | NA                                  | 2.6E-11                           |
| Y-92 (*)                   | 4.8E-12                             | 2.6E-09                             | NA                                  | 4.4E-10                           |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Ingestión                           |                                     |                                     | Contaminación                     |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|                            | Médula roja                         | Colon                               | Tiroides                            | Dermis                            |
|                            | AF <sub>2,IV</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>4,IV</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>5,IV</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>6R,V</sub> <sup>e</sup>   |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/(sxBq/cm <sup>2</sup> )) |
| Y-93 (*)                   | 4.4E-12                             | 8.3E-09                             | NA                                  | 4.2E-10                           |
| Zr-88 +                    | 1.9E-10                             | 2.1E-09                             | NA                                  | 3.7E-11                           |
| Zr-93 +                    | 7.7E-12                             | 1.0E-09                             | NA                                  | 5.4E-13                           |
| Zr-95 +                    | 2.3E-10                             | 5.1E-09                             | NA                                  | 4.7E-11                           |
| Zr-97 +(*)                 | 1.2E-10                             | 1.5E-08                             | NA                                  | 6.3E-10                           |
| Nb-93m                     | 1.9E-12                             | 9.3E-10                             | NA                                  | 5.4E-13                           |
| Nb-94                      | 3.6E-10                             | 8.3E-09                             | NA                                  | 8.8E-11                           |
| Nb-95                      | 1.6E-10                             | 2.8E-09                             | NA                                  | 9.3E-12                           |
| Nb-97 (*)                  | 4.1E-12                             | 1.4E-10                             | NA                                  | 2.9E-10                           |
| Mo-93 +                    | 4.7E-11                             | 4.3E-10                             | NA                                  | 3.6E-12                           |
| Mo-99 +                    | 6.1E-10                             | 4.9E-10                             | 6.7E-11                             | 2.3E-10                           |
| Tc-95m                     | 1.9E-10                             | 1.5E-09                             | 5.1E-10                             | ND                                |
| Tc-96                      | 4.5E-10                             | 3.0E-09                             | 1.0E-09                             | 3.1E-11                           |
| Tc-96m +                   | 3.9E-12                             | 2.8E-11                             | 1.1E-11                             | 3.3E-11                           |
| Tc-97                      | 3.5E-12                             | 2.3E-10                             | 1.1E-10                             | 2.9E-12                           |
| Tc-97m                     | 2.9E-11                             | 2.2E-09                             | 9.1E-10                             | 4.9E-12                           |
| Tc-98                      | 4.6E-10                             | 6.1E-09                             | 2.2E-09                             | 5.0E-11                           |
| Tc-99                      | 3.3E-11                             | 2.5E-09                             | 1.0E-09                             | 8.7E-12                           |
| Tc-99m (*)                 | 4.2E-12                             | 3.7E-11                             | 8.5E-11                             | 2.5E-12                           |
| Ru-97                      | 3.9E-11                             | 7.2E-10                             | NA                                  | 1.1E-11                           |
| Ru-103 +                   | 1.3E-10                             | 4.3E-09                             | NA                                  | 1.0E-11                           |
| Ru-105 +                   | 2.2E-11                             | 1.5E-09                             | NA                                  | 2.6E-10                           |
| Ru-106 +                   | 2.9E-10                             | 4.4E-08                             | NA                                  | 4.5E-10                           |
| Rh-99                      | 1.4E-10                             | 2.5E-09                             | NA                                  | 2.4E-11                           |
| Rh-101                     | 7.7E-11                             | 1.7E-09                             | NA                                  | 8.4E-12                           |
| Rh-102                     | 5.5E-10                             | 4.5E-09                             | NA                                  | 8.6E-11                           |
| Rh-102m                    | 1.5E-10                             | 6.2E-09                             | NA                                  | 1.5E-10                           |
| Rh-103m (*)                | 5.0E-15                             | 5.7E-12                             | NA                                  | 4.3E-13                           |
| Rh-105                     | 1.2E-11                             | 2.8E-09                             | NA                                  | 7.3E-11                           |
| Pd-103 +                   | 1.5E-12                             | 1.5E-09                             | NA                                  | 2.6E-12                           |
| Pd-107                     | 4.2E-14                             | 3.0E-10                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Pd-109 (*)                 | 8.0E-13                             | 4.1E-09                             | NA                                  | 2.3E-10                           |
| Ag-105                     | 1.4E-10                             | 1.7E-09                             | NA                                  | 1.5E-11                           |
| Ag-108m                    | 4.7E-10                             | 5.5E-09                             | NA                                  | 3.5E-10                           |
| Ag-110m                    | 7.3E-10                             | 7.9E-09                             | NA                                  | 5.9E-11                           |
| Ag-111                     | 2.2E-11                             | 9.7E-09                             | NA                                  | 2.2E-10                           |
| Cd-109                     | 1.5E-11                             | 2.8E-09                             | NA                                  | 3.6E-12                           |
| Cd-113m                    | 2.3E-11                             | 5.7E-09                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Cd-115 +                   | 6.5E-11                             | 1.0E-08                             | NA                                  | 3.5E-10                           |
| Cd-115m                    | 6.8E-11                             | 1.8E-08                             | NA                                  | 2.9E-10                           |
| In-111                     | 7.4E-11                             | 1.5E-09                             | NA                                  | 1.5E-11                           |
| In-113m (*)                | 2.4E-12                             | 8.1E-11                             | NA                                  | 1.2E-10                           |
| In-114m                    | 1.2E-09                             | 2.8E-08                             | NA                                  | 6.2E-12                           |
| In-115m (*)                | 4.9E-12                             | 4.8E-10                             | NA                                  | 2.2E-10                           |
| Sn-113 +                   | 8.1E-11                             | 5.1E-09                             | NA                                  | 1.2E-10                           |
| Sn-117m                    | 6.7E-11                             | 5.2E-09                             | NA                                  | 4.2E-12                           |
| Sn-119m                    | 1.1E-11                             | 2.6E-09                             | NA                                  | 2.2E-12                           |
| Sn-121m +                  | 1.7E-11                             | 4.0E-09                             | NA                                  | 3.5E-11                           |
| Sn-123                     | 5.8E-11                             | 1.6E-08                             | NA                                  | 2.9E-10                           |
| Sn-125                     | 1.9E-10                             | 2.4E-08                             | NA                                  | 6.7E-10                           |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Ingestión                           |                                     |                                     | Contaminación                     |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|                            | Médula roja                         | Colon                               | Tiroides                            | Dermis                            |
|                            | AF <sub>2,IV</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>4,IV</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>5,IV</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>6R,V</sub> <sup>e</sup>   |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/(sxBq/cm <sup>2</sup> )) |
| Sn-126 +                   | 1.4E-09                             | 4.0E-08                             | NA                                  | 3.3E-10                           |
| Sb-122                     | 2.1E-10                             | 1.2E-08                             | NA                                  | 3.1E-10                           |
| Sb-124                     | 8.4E-10                             | 1.4E-08                             | NA                                  | 2.0E-10                           |
| Sb-125 +                   | 6.4E-10                             | 5.7E-09                             | 6.5E-10                             | 3.7E-11                           |
| Sb-126                     | 8.9E-10                             | 1.2E-08                             | NA                                  | 2.2E-10                           |
| Te-121                     | 3.3E-10                             | 1.2E-09                             | 2.4E-10                             | 1.1E-11                           |
| Te-121m +                  | 8.1E-10                             | 2.9E-09                             | 8.6E-10                             | 1.7E-11                           |
| Te-123m                    | 5.9E-10                             | 2.7E-09                             | 7.8E-10                             | 3.5E-12                           |
| Te-125m                    | 5.2E-10                             | 2.8E-09                             | 7.7E-10                             | 3.8E-12                           |
| Te-127 (*)                 | 1.0E-11                             | 1.1E-09                             | 1.7E-11                             | 1.3E-10                           |
| Te-127m +                  | 1.5E-09                             | 7.1E-09                             | 2.1E-09                             | 5.3E-12                           |
| Te-129 (*)                 | 9.4E-13                             | 1.2E-10                             | 7.5E-13                             | 3.0E-10                           |
| Te-129m +                  | 2.5E-09                             | 1.4E-08                             | 3.7E-09                             | 1.1E-10                           |
| Te-131m +                  | 3.4E-10                             | 6.0E-09                             | 9.3E-08                             | 4.3E-10                           |
| Te-132 +                   | 5.4E-10                             | 1.3E-08                             | 3.2E-08                             | 3.0E-10                           |
| I-123 (*)                  | 6.5E-12                             | 1.2E-11                             | 7.8E-10                             | 4.4E-12                           |
| I-124                      | 1.4E-10                             | 1.4E-10                             | 5.1E-08                             | ND                                |
| I-125                      | 1.3E-11                             | 2.4E-11                             | 2.6E-08                             | 4.3E-12                           |
| I-126                      | 1.4E-10                             | 1.2E-10                             | 9.6E-08                             | 1.0E-10                           |
| I-129                      | 2.1E-11                             | 5.4E-11                             | 7.3E-08                             | 2.2E-12                           |
| I-131                      | 9.6E-11                             | 1.2E-10                             | 8.1E-08                             | 1.1E-10                           |
| I-132 (*)                  | 2.6E-11                             | 4.6E-11                             | 3.4E-09                             | 2.9E-10                           |
| I-133 (*)                  | 4.7E-11                             | 1.1E-10                             | 8.2E-08                             | 2.6E-10                           |
| I-134 (*)                  | 1.1E-11                             | 2.1E-11                             | 5.4E-10                             | 3.5E-10                           |
| I-135 (*)                  | 4.0E-11                             | 7.3E-11                             | 1.6E-08                             | 2.3E-10                           |
| Xe-122                     | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Xe-123 +                   | 7.3E-13                             | 1.3E-12                             | 4.4E-10                             | 0.0E+00                           |
| Xe-127                     | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Xe-131m                    | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Xe-133                     | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Xe-135                     | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Cs-129                     | 4.7E-11                             | 6.8E-11                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Cs-131                     | 3.4E-11                             | 6.0E-11                             | NA                                  | 2.3E-12                           |
| Cs-132                     | 4.5E-10                             | 5.4E-10                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Cs-134                     | 3.7E-09                             | 4.4E-09                             | NA                                  | 1.1E-10                           |
| Cs-134m +                  | 4.0E-12                             | 7.4E-12                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Cs-135                     | 3.4E-10                             | 4.6E-10                             | NA                                  | 2.0E-14                           |
| Cs-136                     | 2.4E-09                             | 2.9E-09                             | NA                                  | 4.6E-11                           |
| Cs-137 +                   | 2.3E-09                             | 2.9E-09                             | NA                                  | 1.4E-10                           |
| Ba-131 +                   | 1.8E-10                             | 2.3E-09                             | NA                                  | 1.4E-11                           |
| Ba-133                     | 2.5E-10                             | 2.7E-09                             | NA                                  | 1.5E-11                           |
| Ba-133m                    | 6.8E-11                             | 4.0E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Ba-140 +                   | 1.1E-09                             | 2.3E-08                             | NA                                  | 4.9E-10                           |
| La-137                     | 5.1E-12                             | 3.9E-10                             | NA                                  | ND                                |
| La-140                     | 2.6E-10                             | 1.3E-08                             | NA                                  | 3.2E-10                           |
| Ce-139                     | 3.5E-11                             | 1.6E-09                             | NA                                  | 5.1E-12                           |
| Ce-141                     | 1.8E-11                             | 5.5E-09                             | NA                                  | 5.6E-11                           |
| Ce-143 +                   | 3.5E-11                             | 8.4E-09                             | NA                                  | 4.5E-10                           |
| Ce-144 +                   | 2.4E-11                             | 4.2E-08                             | NA                                  | 4.3E-10                           |
| Pr-142 (*)                 | 4.5E-12                             | 1.0E-08                             | NA                                  | 3.6E-10                           |
| Pr-143                     | 1.4E-12                             | 9.4E-09                             | NA                                  | 2.0E-10                           |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Ingestión                           |                                     |                                     | Contaminación                     |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|                            | Médula roja                         | Colon                               | Tiroides                            | Dermis                            |
|                            | AF <sub>2,IV</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>4,IV</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>5,IV</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>6R,V</sub> <sup>e</sup>   |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/(sxBq/cm <sup>2</sup> )) |
| Nd-147 +                   | 3.0E-11                             | 8.3E-09                             | NA                                  | 1.3E-10                           |
| Nd-149 +                   | 3.8E-12                             | 5.5E-10                             | NA                                  | 5.1E-10                           |
| Pm-143                     | 6.5E-11                             | 9.9E-10                             | NA                                  | ND                                |
| Pm-144                     | 3.3E-10                             | 3.7E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Pm-145                     | 7.1E-12                             | 6.4E-10                             | NA                                  | ND                                |
| Pm-147                     | 9.4E-13                             | 2.0E-09                             | NA                                  | 2.1E-13                           |
| Pm-148m                    | 4.1E-10                             | 9.3E-09                             | NA                                  | 9.9E-11                           |
| Pm-149                     | 2.1E-12                             | 7.9E-09                             | NA                                  | 2.3E-10                           |
| Pm-151                     | 3.7E-11                             | 5.3E-09                             | NA                                  | 1.8E-10                           |
| Sm-145 +                   | 1.5E-11                             | 1.4E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Sm-147 (*)                 | 6.8E-11                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Sm-151                     | 3.0E-13                             | 6.4E-10                             | NA                                  | 1.6E-14                           |
| Sm-153                     | 9.5E-12                             | 5.7E-09                             | NA                                  | 1.4E-10                           |
| Eu-147                     | 9.8E-11                             | 2.4E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Eu-148                     | 4.4E-10                             | 4.9E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Eu-149                     | 1.4E-11                             | 6.1E-10                             | NA                                  | ND                                |
| Eu-150b                    | 3.1E-10                             | 4.4E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Eu-150a (*)                | 3.1E-12                             | 2.8E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Eu-152                     | 2.3E-10                             | 6.7E-09                             | NA                                  | 6.9E-11                           |
| Eu-152m                    | 1.5E-11                             | 3.4E-09                             | NA                                  | 2.5E-10                           |
| Eu-154                     | 2.5E-10                             | 1.2E-08                             | NA                                  | 1.3E-10                           |
| Eu-155                     | 1.5E-11                             | 2.2E-09                             | NA                                  | 2.0E-12                           |
| Eu-156                     | 2.3E-10                             | 1.5E-08                             | NA                                  | 1.8E-10                           |
| Gd-146 +                   | 4.4E-10                             | 8.9E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Gd-148 (*)                 | 9.7E-11                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 0.0E+00                           |
| Gd-153                     | 2.5E-11                             | 1.8E-09                             | NA                                  | 5.0E-12                           |
| Gd-159 (*)                 | 4.6E-12                             | 3.7E-09                             | NA                                  | 2.0E-10                           |
| Tb-157                     | 7.0E-13                             | 2.1E-10                             | NA                                  | ND                                |
| Tb-158                     | 1.6E-10                             | 5.4E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Tb-160                     | 2.2E-10                             | 1.0E-08                             | NA                                  | 1.3E-10                           |
| Dy-159                     | 1.1E-11                             | 6.3E-10                             | NA                                  | 3.4E-12                           |
| Dy-165 (*)                 | 3.5E-13                             | 4.1E-10                             | NA                                  | 2.7E-10                           |
| Dy-166 +                   | 1.2E-11                             | 1.5E-08                             | NA                                  | 3.6E-10                           |
| Ho-166                     | 3.3E-12                             | 1.1E-08                             | NA                                  | 3.3E-10                           |
| Ho-166m                    | 3.7E-10                             | 7.7E-09                             | NA                                  | 2.9E-11                           |
| Er-169                     | 8.4E-13                             | 3.0E-09                             | NA                                  | 1.6E-11                           |
| Er-171                     | 1.7E-11                             | 2.3E-09                             | NA                                  | 2.4E-10                           |
| Tm-167                     | 3.1E-11                             | 4.1E-09                             | NA                                  | 2.0E-11                           |
| Tm-170                     | 8.1E-12                             | 1.1E-08                             | NA                                  | 2.1E-10                           |
| Tm-171                     | 7.2E-13                             | 8.2E-10                             | NA                                  | 5.2E-14                           |
| Yb-169                     | 7.0E-11                             | 4.7E-09                             | NA                                  | 1.2E-11                           |
| Yb-175                     | 7.4E-12                             | 3.4E-09                             | NA                                  | 4.7E-11                           |
| Lu-172                     | 3.2E-10                             | 6.5E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Lu-173                     | 3.1E-11                             | 1.6E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Lu-174                     | 2.7E-11                             | 1.7E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Lu-174m +                  | 1.6E-11                             | 4.0E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Lu-177 (*)                 | 7.6E-12                             | 4.2E-09                             | NA                                  | 5.2E-11                           |
| Hf-172 +                   | 4.0E-10                             | 1.1E-08                             | NA                                  | ND                                |
| Hf-175                     | 8.5E-11                             | 2.3E-09                             | NA                                  | 3.4E-11                           |
| Hf-181                     | 1.3E-10                             | 7.5E-09                             | NA                                  | 6.3E-11                           |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Ingestión                           |                                     |                                     | Contaminación                     |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|                            | Médula roja                         | Colon                               | Tiroides                            | Dermis                            |
|                            | AF <sub>2,IV</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>4,IV</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>5,IV</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>6R,V</sub> <sup>e</sup>   |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/(sxBq/cm <sup>2</sup> )) |
| Hf-182 +                   | 3.1E-10                             | 1.3E-08                             | NA                                  | 6.6E-11                           |
| Ta-178a (*)                | 1.3E-11                             | 2.3E-10                             | NA                                  | ND                                |
| Ta-179                     | 7.7E-12                             | 4.1E-10                             | NA                                  | ND                                |
| Ta-182                     | 2.5E-10                             | 9.3E-09                             | NA                                  | 6.2E-11                           |
| W-178                      | 2.9E-11                             | 1.4E-09                             | NA                                  | ND                                |
| W-181                      | 1.1E-11                             | 4.4E-10                             | NA                                  | 3.0E-12                           |
| W-185                      | 1.6E-11                             | 3.4E-09                             | NA                                  | 4.0E-11                           |
| W-187 (*)                  | 5.4E-11                             | 4.9E-09                             | NA                                  | 1.7E-10                           |
| W-188 +                    | 1.8E-10                             | 1.9E-08                             | 6.3E-09                             | 3.7E-10                           |
| Re-184                     | 2.9E-10                             | 2.2E-09                             | 1.6E-09                             | 1.6E-11                           |
| Re-184m +                  | 3.0E-10                             | 3.7E-09                             | 2.8E-09                             | 1.6E-11                           |
| Re-186                     | 9.9E-11                             | 4.2E-09                             | 4.8E-09                             | 2.2E-10                           |
| Re-187                     | 3.5E-13                             | 1.3E-11                             | 1.1E-11                             | 0.0E+00                           |
| Re-188 (*)                 | 8.0E-11                             | 3.1E-09                             | 6.6E-09                             | 3.6E-10                           |
| Re-189                     | 5.2E-11                             | 1.9E-09                             | 3.5E-09                             | ND                                |
| Os-185                     | 1.6E-10                             | 2.1E-09                             | NA                                  | 1.6E-11                           |
| Os-191                     | 1.9E-11                             | 4.3E-09                             | NA                                  | 5.2E-12                           |
| Os-191m +                  | 1.1E-12                             | 7.1E-10                             | NA                                  | 7.5E-12                           |
| Os-193                     | 9.5E-12                             | 6.2E-09                             | NA                                  | 2.2E-10                           |
| Os-194 +                   | 4.4E-11                             | 2.7E-08                             | NA                                  | 3.7E-10                           |
| Ir-189                     | 1.8E-11                             | 1.8E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Ir-190                     | 2.9E-10                             | 6.5E-09                             | NA                                  | 4.0E-11                           |
| Ir-192                     | 1.9E-10                             | 8.5E-09                             | NA                                  | 1.3E-10                           |
| Ir-194 (*)                 | 8.9E-12                             | 1.0E-08                             | NA                                  | 3.7E-10                           |
| Pt-188 +                   | 2.3E-10                             | 5.4E-09                             | NA                                  | 2.2E-11                           |
| Pt-191                     | 5.0E-11                             | 2.1E-09                             | NA                                  | 2.1E-11                           |
| Pt-193                     | 1.2E-13                             | 2.5E-10                             | NA                                  | 2.0E-12                           |
| Pt-193m                    | 2.8E-12                             | 3.6E-09                             | NA                                  | 4.5E-12                           |
| Pt-195m                    | 1.4E-11                             | 4.9E-09                             | NA                                  | 7.5E-12                           |
| Pt-197 (*)                 | 2.4E-12                             | 3.0E-09                             | NA                                  | 1.1E-10                           |
| Pt-197m +(*)               | 9.2E-13                             | 4.1E-10                             | NA                                  | 3.4E-10                           |
| Au-193                     | 1.5E-11                             | 8.5E-10                             | NA                                  | ND                                |
| Au-194                     | 1.3E-10                             | 1.9E-09                             | NA                                  | 1.4E-11                           |
| Au-195                     | 2.4E-11                             | 1.8E-09                             | NA                                  | 6.0E-12                           |
| Au-198                     | 7.6E-11                             | 7.3E-09                             | NA                                  | 2.1E-10                           |
| Au-199                     | 2.1E-11                             | 3.3E-09                             | NA                                  | 1.2E-11                           |
| Hg-194 +                   | 2.1E-09                             | 4.1E-09                             | NA                                  | 1.6E-11                           |
| Hg-195m +                  | 1.4E-10                             | 4.0E-09                             | NA                                  | 1.6E-11                           |
| Hg-197                     | 5.9E-11                             | 1.7E-09                             | NA                                  | 5.1E-12                           |
| Hg-197m +                  | 7.8E-11                             | 3.5E-09                             | NA                                  | 1.1E-11                           |
| Hg-203                     | 7.3E-10                             | 3.5E-09                             | NA                                  | 1.8E-11                           |
| Tl-200                     | 1.5E-10                             | 2.8E-10                             | NA                                  | 3.8E-11                           |
| Tl-201                     | 5.6E-11                             | 2.3E-10                             | NA                                  | 4.8E-12                           |
| Tl-202                     | 3.5E-10                             | 7.9E-10                             | NA                                  | 2.1E-11                           |
| Tl-204                     | 5.9E-10                             | 3.9E-09                             | NA                                  | 1.5E-10                           |
| Pb-201 +                   | 4.7E-11                             | 7.1E-10                             | NA                                  | 4.8E-12                           |
| Pb-202 +                   | 5.4E-10                             | 1.2E-09                             | NA                                  | 2.1E-11                           |
| Pb-203                     | 6.8E-11                             | 1.3E-09                             | NA                                  | 2.3E-11                           |
| Pb-205                     | 1.9E-11                             | 1.9E-10                             | NA                                  | 2.0E-12                           |
| Pb-210 +                   | 2.5E-08                             | 1.3E-08                             | NA                                  | 1.9E-10                           |
| Pb-212 +(*)                | 6.6E-09                             | 1.9E-08                             | NA                                  | 6.1E-10                           |

| Radionucleido <sup>a</sup> | Ingestión                           |                                     |                                     | Contaminación                     |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|                            | Médula roja                         | Colon                               | Tiroides                            | Dermis                            |
|                            | AF <sub>2,IV</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>4,IV</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>5,IV</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>6R,V</sub> <sup>e</sup>   |
|                            | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/(sxBq/cm <sup>2</sup> )) |
| Bi-205                     | 3.0E-10                             | 3.7E-09                             | NA                                  | 2.8E-11                           |
| Bi-206                     | 5.6E-10                             | 8.8E-09                             | NA                                  | 9.8E-11                           |
| Bi-207                     | 3.1E-10                             | 6.5E-09                             | NA                                  | 7.0E-11                           |
| Bi-210 +                   | 7.3E-10                             | 1.0E-08                             | NA                                  | 1.9E-10                           |
| Bi-210m                    | 1.7E-10                             | 1.9E-08                             | NA                                  | ND                                |
| Bi-212 +(*)                | 1.3E-12                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 5.7E-10                           |
| Po-210                     | 2.3E-08                             | 1.9E-14                             | NA                                  | 9.3E-17                           |
| At-211                     | 1.1E-09                             | 3.7E-12                             | NA                                  | 7.2E-11                           |
| Rn-222                     | 0.0E+00                             | 0.0E+00                             | NA                                  | 8.6E-15                           |
| Ra-223 +                   | 2.9E-08                             | 3.0E-08                             | NA                                  | 1.3E-11                           |
| Ra-224 +                   | 1.9E-08                             | 2.7E-08                             | NA                                  | 9.2E-13                           |
| Ra-225 +                   | 2.7E-08                             | 1.1E-08                             | NA                                  | 1.5E-11                           |
| Ra-226                     | 7.7E-09                             | 6.9E-09                             | NA                                  | 4.9E-10                           |
| Ra-228 +                   | 2.7E-08                             | 5.8E-08                             | NA                                  | 2.4E-10                           |
| Ac-225                     | 1.1E-09                             | 2.0E-08                             | NA                                  | 1.3E-12                           |
| Ac-227 +                   | 2.9E-08                             | 3.5E-08                             | NA                                  | 8.1E-12                           |
| Ac-228                     | 3.3E-11                             | 2.2E-09                             | NA                                  | 2.3E-10                           |
| Th-227 +                   | 1.4E-08                             | 1.6E-08                             | NA                                  | 2.1E-11                           |
| Th-228 +                   | 2.4E-08                             | 4.0E-08                             | NA                                  | 1.5E-12                           |
| Th-229 +                   | 2.9E-08                             | 2.9E-08                             | NA                                  | 2.2E-11                           |
| Th-230 +                   | 2.5E-10                             | 5.1E-10                             | NA                                  | 5.1E-13                           |
| Th-231                     | 1.8E-12                             | 2.6E-09                             | NA                                  | 9.0E-12                           |
| Th-232 +                   | 1.9E-08                             | 4.1E-08                             | NA                                  | 5.1E-13                           |
| Th-234 +                   | 1.8E-11                             | 2.7E-08                             | NA                                  | 1.2E-10                           |
| Pa-230 +                   | 2.0E-10                             | 3.3E-09                             | NA                                  | 2.5E-11                           |
| Pa-231 +                   | 8.2E-09                             | 1.2E-08                             | NA                                  | 6.5E-12                           |
| Pa-233                     | 4.5E-11                             | 6.5E-09                             | NA                                  | 4.4E-11                           |
| U-230 +                    | 4.3E-09                             | 1.4E-09                             | NA                                  | 7.3E-13                           |
| U-232 +                    | 2.4E-08                             | 3.8E-08                             | NA                                  | 1.3E-12                           |
| U-233                      | 8.3E-10                             | 2.1E-10                             | NA                                  | 7.0E-12                           |
| U-234 +                    | 8.2E-10                             | 4.3E-10                             | NA                                  | 1.1E-12                           |
| U-235 +                    | 8.2E-10                             | 7.3E-09                             | NA                                  | 1.3E-11                           |
| U-236                      | 7.7E-10                             | 3.7E-10                             | NA                                  | 1.1E-12                           |
| U-238 +                    | 7.8E-10                             | 2.9E-08                             | NA                                  | 1.4E-12                           |
| U empobrecido              | 7.7E-10                             | 1.5E-09                             | NA                                  | 7.1E-13                           |
| Np-235                     | 6.4E-13                             | 4.0E-10                             | NA                                  | ND                                |
| Np-236b +                  | 2.3E-11                             | 1.3E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Np-236a                    | 3.1E-11                             | 7.1E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Np-237 +                   | 2.1E-10                             | 9.2E-09                             | NA                                  | 4.7E-11                           |
| Np-239                     | 2.6E-11                             | 6.0E-09                             | NA                                  | 5.2E-11                           |
| Pu-236                     | 2.2E-10                             | 4.5E-10                             | NA                                  | ND                                |
| Pu-237                     | 1.1E-11                             | 6.7E-10                             | NA                                  | ND                                |
| Pu-238                     | 2.1E-10                             | 3.6E-10                             | NA                                  | 6.0E-13                           |
| Pu-239                     | 2.0E-10                             | 2.3E-10                             | NA                                  | 2.3E-13                           |
| Pu-240                     | 2.0E-10                             | 3.6E-10                             | NA                                  | 5.7E-13                           |
| Pu-241 +                   | 1.6E-12                             | 1.7E-10                             | NA                                  | 1.7E-14                           |
| Pu-242                     | 1.9E-10                             | 3.0E-10                             | NA                                  | 4.9E-13                           |
| Pu-244 +                   | 2.7E-10                             | 2.7E-08                             | NA                                  | 4.9E-12                           |
| Am-241                     | 1.2E-10                             | 1.9E-09                             | NA                                  | 3.7E-12                           |
| Am-242m +                  | 1.1E-10                             | 7.6E-09                             | NA                                  | 1.3E-12                           |

| Radionucleido <sup>a</sup>                        | Ingestión                           |                                     |                                     | Contaminación                     |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|   | Médula roja                         | Colon                               | Tiroides                            | Dermis                            |
|   | AF <sub>2,IV</sub> (Δ) <sup>b</sup> | AF <sub>4,IV</sub> (Δ) <sup>c</sup> | AF <sub>5,IV</sub> (Δ) <sup>d</sup> | AF <sub>6R,V</sub> <sup>e</sup>   |
|   | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/Bq)                        | ((Gy-Eq)/(s×Bq/cm <sup>2</sup> )) |
| Am-243 +  | 1.6E-10                             | 9.7E-09                             | NA                                  | 3.9E-13                           |
| Am-244  | 4.3E-11                             | 2.9E-09                             | NA                                  | 6.0E-11                           |
| Cm-240  | 9.2E-11                             | 3.6E-10                             | NA                                  | ND                                |
| Cm-241 +  | 1.1E-10                             | 5.2E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Cm-242  | 1.2E-10                             | 3.3E-10                             | NA                                  | 5.4E-13                           |
| Cm-243  | 1.5E-10                             | 4.8E-09                             | NA                                  | 1.8E-11                           |
| Cm-244  | 1.2E-10                             | 2.9E-10                             | NA                                  | 5.1E-13                           |
| Cm-245  | 1.3E-10                             | 2.4E-09                             | NA                                  | 4.5E-12                           |
| Cm-246  | 1.1E-10                             | 2.7E-10                             | NA                                  | 1.7E-12                           |
| Cm-247  | 1.8E-10                             | 6.4E-09                             | NA                                  | 1.1E-11                           |
| Cm-248 (*)  | 6.9E-10                             | ND                                  | NA                                  | 2.8E-10                           |
| Bk-247  | 2.7E-10                             | 2.2E-09                             | NA                                  | ND                                |
| Bk-249  | 7.3E-13                             | 1.1E-09                             | NA                                  | 1.3E-11                           |
| Cf-248 +  | 2.7E-10                             | 2.0E-10                             | NA                                  | ND                                |
| Cf-249  | 3.3E-10                             | 2.1E-09                             | NA                                  | 1.7E-11                           |
| Cf-250 <sup>g</sup>                               | 2.7E-10                             | 1.9E-10                             | NA                                  | 3.5E-12                           |
| Cf-251  | 2.9E-10                             | 6.8E-09                             | NA                                  | 3.6E-11                           |
| Cf-252 (*)  | 6.4E-10                             | ND                                  | NA                                  | 3.7E-10                           |
| Cf-253  | 7.7E-11                             | 2.4E-09                             | NA                                  | 3.8E-12                           |
| Cf-254 (*)  | 2.8E-08                             | 5.0E-07                             | NA                                  | 3.5E-09                           |
| <sup>239</sup> Pu/ <sup>239</sup> Be <sup>h</sup> | 2.0E-10                             | 2.3E-10                             | NA                                  | 2.3E-13                           |
| <sup>241</sup> Am/ <sup>241</sup> Be <sup>h</sup> | 1.2E-10                             | 1.9E-09                             | NA                                  | 3.7E-12                           |

<sup>a</sup> Al calcular los valores D para todos los radionucleidos se tuvo en cuenta el aumento interno de la progenie radiactiva, como se señala en el Apéndice VIII. El símbolo '+' indica los radionucleidos en cuyo caso la progenie fue una fuente significativa de dosis en los escenarios considerados. Los factores se basan en datos de la Ref. [49] excepto cuando se indica mediante un "\*" que se basan en datos de [50].

<sup>b</sup> Dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días (Δ) en la médula roja por ingestión.

<sup>c</sup> Dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días (Δ) en el colon por ingestión.

<sup>d</sup> Dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 365 días (Δ) en la tiroides por ingestión.

<sup>e</sup> Tasa de dosis ponderada según EBR en la dermis.

<sup>f</sup> "NA" significa "no aplicable". "ND" significa "no hay datos".

<sup>g</sup> La actividad dada es la de un radionucleido emisor alfa, p. ej. el <sup>239</sup>Pu o el <sup>241</sup>Am.

<sup>h</sup> Como se explica en la Sección 5, no se tuvo en cuenta la dosis debida a los neutrones.

## VI.2. CONTAMINACIÓN DE LA PIEL

En el enfoque riesgo se utilizaron factores de conversión de dosis, AF<sub>6R,V</sub>, iguales a la tasa de dosis ponderada según EBR en el Tejido 6R (dermis) por unidad de actividad superficial de un radionucleido, causada según el escenario V. Los valores de estos factores de conversión de dosis específicos de cada radionucleido se calcularon como una suma de tres términos, los cuales se presentan en la ecuación (70). El primer término que figura en el lado derecho de dicha ecuación representa las contribuciones debidas a los fotones discretos de energía E<sub>γ,i</sub> y rendimiento Y<sub>i</sub><sup>γ</sup> por transformación nuclear. El segundo término es la contribución de los electrones de conversión de rendimiento Y<sub>j</sub><sup>e</sup> y energía cinética E<sub>e,j</sub>, y el último término es la contribución del espectro beta con una energía máxima E<sub>e</sub><sup>0</sup>:

$$\begin{aligned}
AF_{6R,V} = & \sum_i^n Y_i^\gamma \times d_{6R,V}^\gamma(E_{\gamma,i}) + \\
& + \sum_j^m Y_j^e \times d_{6R,V}^e(E_{e,j}) + \int_0^{E_e^0} n_\beta(E_e, E_e^0) d_{6R,V}^e(E_e) dE_e.
\end{aligned}
\tag{70}$$

donde:

$AF_{6R,V}$  es el factor de conversión de dosis según EBR para la dermis (Tejido 6R), causada por contaminación distribuida uniformemente en la superficie de la piel, como se indica en el Escenario V, ((Gy-Eq)/(s×Bq/cm<sup>2</sup>));

$n_\beta(E_e, E_e^0) dE_e$  es el promedio de electrones de energía comprendida entre  $E_e$  y  $E_e+dE_e$  originados por la desintegración beta de un radionucleido con una energía de desintegración beta máxima  $E_e^0$ , (MeV), tomado de la Ref. [52];

$d_{6R,V}^\gamma(E_\gamma)$  es la función respuesta igual a la dosis ponderada según EBR en la dermis a 40 mg×cm<sup>-2</sup> (0,4 mm o 400 μm) bajo la superficie de la piel, debida a una fuente de fotones de energía  $E_\gamma$ , distribuida uniformemente en la superficie de la piel, ((Gy-Eq)×cm<sup>2</sup>);

$d_{6R,V}^e(E_e)$  es la función respuesta igual a la dosis ponderada según EBR en la dermis debida a una fuente de electrones de energía  $E_e$ , distribuida uniformemente en la superficie de la piel, ((Gy-Eq)×cm<sup>2</sup>).

La suma del primer término en el lado derecho de la ecuación (70) es la dosis ponderada según EBR por irradiación de la dermis debida a los fotones emitidos por el radionucleido en cuestión. Para calcular los factores de conversión de dosis se utilizaron los valores de esta magnitud, presentados por Rohloff y Heinzelmann [53]. La ecuación empírica desarrollada por Faw [54] se utilizó para calcular la función respuesta de dosis ponderada según EBR en la dermis debida a una fuente de electrones de energía  $E_e$ , distribuida uniformemente en la superficie de la piel, ((Gy-Eq)×cm<sup>2</sup>).

$$d_{6R,V}^e(E_e) = 1.602 \times 10^{-10} \frac{2.7767 + y(8.5167 + y(8.1517 + 2.3104y))}{1 + y(2.5806 + y(1.6233 - 0.2723y))},
\tag{1}$$

donde:

$y = \log_{10} E_e$  y  $E_e$  es la energía de los electrones, (MeV). Esta ecuación es válida para electrones de una energía mínima,  $E_{min}$ , de más de 0,18 MeV. Para los electrones de energía mínima inferior a ésta,  $d_{6R,V}^e(E_e)$  es igual a cero.

Debería [15] evaluarse la dosis a una profundidad de 300-500 μm con el fin de estimar los efectos deterministas graves tales como la descamación húmeda. Este método se utilizó en el enfoque riesgo, en el que se supuso que se desarrollaban efectos deterministas graves a raíz de una irradiación de más de 100 cm<sup>2</sup> del tejido cutáneo [12] situado a una profundidad de 400 μm (40 mg×cm<sup>-2</sup>).

La comparación de los resultados calculados con los ya publicados [54, 55, 56, 57, 58] muestra una concordancia satisfactoria. Los valores del factor de conversión de dosis  $AF_{6R,V}$  se enumeran en el Cuadro 19.

### VI.3. INMERSIÓN

En el enfoque riesgo se utilizaron factores de conversión de dosis,  $AF_{2,VI}$ , iguales a la tasa de dosis ponderada según EBR en el Tejido 2 (médula roja) debida a la inmersión en un gas noble radiactivo. Los datos de la nube semi-infinita de la Ref. [40] utilizados en el cálculo de  $AF_{2,VI}$  son una aproximación correcta a la situación de inmersión en aire [40]. El uso de estos factores de dosis para la exposición externa a la radiación  $\gamma$  debida a inmersión en una habitación de 300 m<sup>3</sup> (Escenario VI) dio por resultado unas estimaciones conservadoras de la exposición, cuenta habida de la diferencia de tamaño entre la habitación y una nube infinita. Los valores del factor de conversión de dosis  $AF_{2,VI}$  se enumeran en el Cuadro 20.

CUADRO 20. FACTORES DE CONVERSIÓN DE DOSIS PONDERADA SEGÚN EBR PARA LA INMERSIÓN EN UN GAS RADIATIVO

| Radionucleido | Médula roja                    | Radionucleido | Médula roja                    |
|---------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|
|               | $AF_{2,VI}$                    |               | $AF_{2,VI}$                    |
|               | (Gy-Eq)/(Bqxs/m <sup>3</sup> ) |               | (Gy-Eq)/(Bqxs/m <sup>3</sup> ) |
| N-13          | 4.60E-14                       | Kr-87         | 4.00E-14                       |
| Ar-37         | 0.00E+00                       | Xe-122        | 4.50E-14                       |
| Ar-39         | 6.60E-18                       | Xe-123        | 3.50E-14                       |
| Ar-41         | 6.30E-14                       | Xe-127        | 1.10E-14                       |
| Kr-81         | 2.40E-16                       | Xe-131m       | 2.30E-16                       |
| Kr-85         | 1.10E-16                       | Xe-133        | 1.10E-15                       |
| Kr-85m        | 6.40E-15                       | Xe-135        | 1.10E-14                       |



**APÉNDICE VII  
EVALUACIÓN DE LOS VALORES D**

En esta sección se presenta una caracterización general y una evaluación de los valores D recomendados que figuran en el Cuadro 1.

**VII.1. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LOS VALORES D RECOMENDADOS**

El Cuadro 21 muestra las condiciones que limitan los valores  $D_1$ . En la mayoría de los casos (312 de los 369 analizados), la exposición a una fuente adyacente determina la actividad peligrosa de un material radiactivo no dispersado. La exposición a una fuente distante es limitativa para 13 radionucleidos. Por regla general, estos radionucleidos tienen una actividad específica muy baja y no superan la prueba “bolsillo” porque no podrían ser transportados en un bolsillo. En 19 casos el valor  $D_1$  está limitado por la criticidad y en 25 casos los valores  $D_1$  son ilimitados.

CUADRO 21. CONDICIONES QUE LIMITAN LOS VALORES  $D_1$

| Limitados por el desarrollo de efectos deterministas graves en el órgano o tejido: | Escenario |    |
|--|-----------|----|
|  | I         | II |
| Tejido blando  | 312       |    |
| Médula roja  |           |    |
| Región AI del tracto respiratorio  |           |    |
| Colon  |           |    |
| Tiroides   |           |    |
| Dermis   |           |    |
| Torso  |           | 13 |
| Limitados por la criticidad  | 19        |    |
| Ilimitados   | 25        |    |
| Total  | 369       |    |

El Cuadro 22 muestra las condiciones que limitan los valores  $D_2$ . En la mayoría de los casos (314 de los 369 analizados), la inhalación y la exposición por contacto de la dermis determinan la actividad peligrosa de un material radiactivo dispersado. La médula roja, la región alveolar del tracto respiratorio y la dermis son los órganos críticos que definen los valores  $D_2$ . El Cuadro 22 también muestra que la incorporación por ingestión vinculada a la ingestión involuntaria o al consumo de agua contaminada es importante solo en el caso del  $^{14}\text{C}$ . En 10 casos el valor  $D_2$  está limitado por la criticidad y en 17 casos los valores  $D_2$  son ilimitados.

CUADRO 22. CONDICIONES QUE LIMITAN LOS VALORES  $D_2$

| Limitados por el desarrollo de efectos deterministas graves en el órgano o tejido: | Escenario |    |    |    |
|--|-----------|----|----|----|
|  | IIIR      | IV | V  | VI |
| Tejido blando  |           |    |    |    |
| Médula roja  | 119       | 1  |    | 12 |
| Región AI del tracto respiratorio  | 76        |    |    |    |
| Colon  | 10        | 0  |    |    |
| Tiroides   | 28        | 0  |    |    |
| Dermis   |           |    | 96 |    |
| Torso  |           |    |    |    |
| Limitados por la criticidad  | 10        |    |    |    |
| Ilimitados   | 17        |    |    |    |
| Total  | 369       |    |    |    |

El Cuadro 23 muestra las condiciones que limitan el valor D (el menor de los valores  $D_1$  y  $D_2$ ). En la mayoría de los casos (266 de los 369 analizados), la exposición a una fuente adyacente determina la cantidad peligrosa de material radiactivo. Tan solo en seis casos ( $^{97m}\text{Tc}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{125m}\text{Te}$ ,  $^{127m}\text{Te}$ ,  $^{125}\text{I}$  y  $^{126}\text{I}$ ) el valor D está limitado por la exposición de la tiroides a material dispersado que contenga radionucleidos tiroidótrofos. En comparación, este efecto limita el valor  $D_2$  en todos los casos de inhalación en los que el material dispersado contenga tales radionucleidos. En 9 casos el valor D está limitado por la criticidad y en 15 casos es ilimitado.

CUADRO 23. CONDICIONES QUE LIMITAN LOS VALORES D

| Limitados por el desarrollo de efectos deterministas graves en el órgano o tejido: | Escenario |    |     |    |   |    |
|--|-----------|----|-----|----|---|----|
|  | I         | II | III | IV | V | VI |
| Tejido blando  | 266       |    |     |    |   |    |
| Médula roja  |           |    | 27  | 1  |   | 0  |
| Región AI del tracto respiratorio  |           |    | 32  |    |   |    |
| Colon  |           |    | 0   | 0  |   |    |
| Tiroides   |           |    | 6   | 0  |   |    |
| Dermis   |           |    |     |    | 8 |    |
| Torso  |           | 5  |     |    |   |    |
| Limitados por la criticidad  | 9         |    |     |    |   |    |
| Ilimitados   | 15        |    |     |    |   |    |
| Total  | 369       |    |     |    |   |    |

## VII.2. VERIFICACIÓN DE LOS VALORES D RECOMENDADOS

En el documento OIEA TECDOC-1432 "Development of extended framework for emergency response criteria" [15] se reconoce que no es posible evitar incertidumbres al llevar a cabo evaluaciones de dosis y se ofrecen orientaciones sobre el establecimiento de niveles de referencia genéricos para la respuesta en caso de emergencia. Hay muchas incertidumbres a la hora de determinar los valores D y se estima que, según sean los datos y las hipótesis, los resultados pueden variar fácilmente en un factor diez o superior. Se realizaron dos comparaciones para validar en cierta medida los valores D recomendados en el Cuadro 1. La primera fue comparar los valores calculados según el enfoque experto con los calculados mediante el enfoque riesgo. La segunda fue examinar qué relación guardaban los valores D calculados con las fuentes que habían sido afectadas en emergencias radiológicas para determinar si los valores concordaban con la experiencia real.

En los enfoques experto y riesgo se utilizaron criterios y datos dosimétricos muy distintos para calcular los valores  $D_2$ . Los valores D basados en el enfoque riesgo se tomaron como línea de referencia porque se establecieron aplicando los métodos más modernos de proyección de la presencia de efectos deterministas que figuran en la Ref. [15].

Al comparar los valores D establecidos mediante los enfoques experto y riesgo, si se tienen en cuenta las incertidumbres en cuanto a factores de dosis, criterios de dosis y parámetros de los escenarios, parece adecuado considerar como despreciable una diferencia entre los valores D inferior a un factor cinco.

En el Cuadro 24 se presentan los valores D calculados mediante los enfoques experto y riesgo para los radionucleidos tratados en el enfoque experto. La comparación entre los valores  $D_1$  determinados mediante el enfoque experto con los obtenidos utilizando el enfoque riesgo verificado muestra que la diferencia entre ellos es despreciable. Ello prueba la validez de los datos dosimétricos y de los criterios utilizados en esos enfoques. Los datos presentados en el Cuadro 24 muestran que el enfoque experto da lugar sistemáticamente a estimaciones más bajas (conservadoras) de los valores  $D_2$ . El valor medio

de la relación  ${}^E D_2 / {}^R D_2$  es  $1.1 \pm 0.3$  (nivel de confianza del 99 %). Hay solo tres casos en los cuales los valores  $D_2$  calculados mediante el enfoque experto son menores en un factor de más de dos que los calculados mediante el enfoque riesgo, y ninguno en el que sean menores en un factor superior a cinco. Además, los valores  $D$  se compararon con valores calculados de forma totalmente independiente utilizando reglas empíricas y factores de dosis de otras fuentes. Se constató que estos resultados también son coherentes con los valores  $D$  calculados aquí.

CUADRO 24. COMPARACIÓN DE LOS VALORES  $D$  OBTENIDOS MEDIANTE LOS ENFOQUES EXPERTO Y RIESGO

| Radionucleido <sup>a</sup> | Valor $D$       |                |                  | Valor $D_1$     |       |     | Valor $D_2$        |       |      |
|----------------------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|-------|-----|--------------------|-------|------|
|                            | (TBq)           |                | E/R <sup>b</sup> | (TBq)           |       | E/R | (TBq)              |       | E/R  |
|                            | E <sup>b</sup>  | R <sup>b</sup> |                  | E               | R     |     | E                  | R     |      |
| H-3                        | 2.E+3           | 1.E+3          | 2.               | UL <sup>c</sup> | UL    | 1.  | 2.E+3 <sup>e</sup> | 1.E+3 | 2.   |
| C-14                       | 5.E+1           | 9.E+2          | 0.06             | 2.E+5           | 1.E+5 | 2.  | 5.E+1              | 9.E+2 | 0.06 |
| P-32                       | 1.E+1           | 8.E+0          | 1.               | 1.E+1           | 1.E+1 | 1.  | 2.E+1              | 8.E+0 | 3.   |
| S-35                       | 6.E+1           | 9.E+1          | 0.7              | 4.E+4           | 4.E+4 | 1.  | 6.E+1              | 9.E+1 | 0.7  |
| Cl-36                      | 2.E+1           | 3.E+1          | 0.7              | 3.E+2           | 2.E+2 | 2.  | 2.E+1 <sup>f</sup> | 3.E+1 | 0.7  |
| Cr-51                      | 2.E+0           | 2.E+0          | 1.               | 2.E+0           | 2.E+0 | 1.  | 5.E+3              | 1.E+3 | 5.   |
| Fe-55                      | 8.E+2           | 4.E+2          | 2.               | UL              | UL    | 1.  | 8.E+2              | 4.E+2 | 2.   |
| Co-57                      | 7.E-1           | 7.E-1          | 1.               | 7.E-1           | 7.E-1 | 1.  | 4.E+2              | 3.E+2 | 1.   |
| Co-60                      | 3.E-2           | 3.E-2          | 1.               | 3.E-2           | 3.E-2 | 1.  | 3.E+1              | 3.E+1 | 1.   |
| Ni-63                      | 6.E+1           | 5.E+2          | 0.1              | UL              | UL    | 1.  | 6.E+1              | 5.E+2 | 0.1  |
| Zn-65                      | 1.E-1           | 1.E-1          | 1.               | 1.E-1           | 1.E-1 | 1.  | 3.E+2              | 1.E+2 | 3.   |
| Ge-68+                     | 7.E-2           | 7.E-2          | 1.               | 7.E-2           | 7.E-2 | 1.  | 2.E+1              | 1.E+1 | 2.   |
| Se-75                      | 2.E-1           | 2.E-1          | 1.               | 2.E-1           | 2.E-1 | 1.  | 2.E+2              | 9.E+1 | 2.   |
| Kr-85                      | 3.E+1           | 3.E+1          | 1.               | 3.E+1           | 3.E+1 | 1.  | 2.E+3              | 2.E+3 | 1.   |
| Sr-89                      | 2.E+1           | 1.E+1          | 2.               | 2.E+1           | 2.E+1 | 1.  | 2.E+1              | 1.E+1 | 2.   |
| Sr-90+                     | 1.E+0           | 5.E+0          | 0.2              | 4.E+0           | 5.E+0 | 0.8 | 1.E+0              | 5.E+0 | 0.2  |
| Y-90                       | 5.E+0           | 5.E+0          | 1.               | 5.E+0           | 5.E+0 | 1.  | 1.E+1              | 1.E+1 | 1.   |
| Y-91                       | 8.E+0           | 9.E+0          | 0.9              | 8.E+0           | 9.E+0 | 0.9 | 2.E+1              | 2.E+1 | 1.   |
| Zr-95+                     | 4.E-2           | 4.E-2          | 1.               | 4.E-2           | 4.E-2 | 1.  | 1.E+1              | 1.E+1 | 1.   |
| Nb-95                      | 9.E-2           | 9.E-2          | 1.               | 9.E-2           | 9.E-2 | 1.  | 6.E+1              | 9.E+1 | 0.7  |
| Mo-99+                     | 3.E-1           | 3.E-1          | 1.               | 3.E-1           | 3.E-1 | 1.  | 2.E+1              | 2.E+1 | 1.   |
| Tc-99m                     | 7.E-1           | 6.E-1          | 1.               | 7.E-1           | 6.E-1 | 1.  | 7.E+2              | 5.E+2 | 1.   |
| Ru-103+                    | 1.E-1           | 1.E-1          | 1.               | 1.E-1           | 1.E-1 | 1.  | 3.E+1              | 5.E+1 | 0.6  |
| Ru-106+                    | 3.E-1           | 3.E-1          | 1.               | 3.E-1           | 3.E-1 | 1.  | 1.E+1              | 5.E+0 | 2.   |
| Pd-103+                    | 9.E+1           | 9.E+1          | 1.               | 9.E+1           | 9.E+1 | 1.  | 1.E+2              | 2.E+2 | 0.5  |
| Cd-109                     | 2.E+1           | 2.E+1          | 1.               | 2.E+1           | 2.E+1 | 1.  | 3.E+1              | 8.E+1 | 0.4  |
| Te-132+                    | 3.E-2           | 3.E-2          | 1.               | 3.E-2           | 3.E-2 | 1.  | 8.E-1              | 3.E-1 | 3.   |
| I-125                      | 2.E-1           | 2.E-1          | 1.               | 1.E+1           | 1.E+1 | 1.  | 2.E-1              | 8.E-1 | 0.3  |
| I-129                      | UL <sup>c</sup> | UL             |                  | UL              | UL    |     | UL                 | UL    |      |
| I-131                      | 2.E-1           | 2.E-1          | 1.               | 2.E-1           | 2.E-1 | 1.  | 2.E-1              | 3.E-1 | 0.7  |
| Cs-134                     | 4.E-2           | 4.E-2          | 1.               | 4.E-2           | 4.E-2 | 1.  | 3.E+1              | 2.E+1 | 2.   |
| Cs-137+                    | 1.E-1           | 1.E-1          | 1.               | 1.E-1           | 1.E-1 | 1.  | 2.E+1              | 3.E+1 | 0.7  |

| Radionucleido <sup>a</sup>                      | Valor D         |                 |                  | Valor D <sub>1</sub> |       |     | Valor D <sub>2</sub> |       |     |
|---|-----------------|-----------------|------------------|----------------------|-------|-----|----------------------|-------|-----|
|   | (TBq)           |                 | E/R <sup>b</sup> | (TBq)                |       | E/R | (TBq)                |       | E/R |
|   | E <sup>b</sup>  | R <sup>b</sup>  |                  | E                    | R     |     | E                    | R     |     |
| Ba-133  | 2.E-1           | 2.E-1           | 1.               | 2.E-1                | 2.E-1 | 1.  | 7.E+1                | 8.E+1 | 0.9 |
| Ce-141  | 1.E+0           | 1.E+0           | 1.               | 1.E+0                | 1.E+0 | 1.  | 2.E+1                | 6.E+1 | 0.3 |
| Ce-144+   | 9.E-1           | 9.E-1           | 1.               | 9.E-1                | 9.E-1 | 1.  | 9.E+0                | 6.E+0 | 2.  |
| Pm-147  | 4.E+1           | 1.E+2           | 0.4              | 8.E+3                | 8.E+3 | 1.  | 4.E+1                | 1.E+2 | 0.4 |
| Eu-152  | 6.E-2           | 6.E-2           | 1.               | 6.E-2                | 6.E-2 | 1.  | 3.E+1                | 4.E+1 | 0.8 |
| Eu-154  | 6.E-2           | 6.E-2           | 1.               | 6.E-2                | 6.E-2 | 1.  | 2.E+1                | 3.E+1 | 0.7 |
| Gd-153  | 1.E+0           | 1.E+0           | 1.               | 1.E+0                | 1.E+0 | 1.  | 8.E+1                | 5.E+1 | 2.  |
| Tm-170  | 2.E+1           | 2.E+1           | 1.               | 2.E+1                | 2.E+1 | 1.  | 2.E+1                | 3.E+1 | 0.7 |
| Yb-169  | 3.E-1           | 3.E-1           | 1.               | 3.E-1                | 3.E-1 | 1.  | 3.E+1                | 7.E+1 | 0.4 |
| Re-188  | 1.E+0           | 1.E+0           | 1.               | 1.E+0                | 1.E+0 | 1.  | 3.E+1                | 7.E+0 | 4.  |
| Ir-192  | 8.E-2           | 8.E-2           | 1.               | 8.E-2                | 8.E-2 | 1.  | 2.E+1                | 3.E+1 | 0.7 |
| Au-198  | 2.E-1           | 2.E-1           | 1.               | 2.E-1                | 2.E-1 | 1.  | 3.E+1                | 3.E+1 | 1.  |
| Hg-203  | 3.E-1           | 3.E-1           | 1.               | 3.E-1                | 3.E-1 | 1.  | 2.E+0                | 1.E+1 | 0.2 |
| Tl-204  | 2.E+1           | 4.E+1           | 0.5              | 7.E+1                | 7.E+1 | 1.  | 2.E+1                | 4.E+1 | 0.5 |
| Po-210  | 6.E-2           | 3.E-1           | 0.2              | 8.E+3                | 8.E+3 | 1.  | 6.E-2                | 3.E-1 | 0.2 |
| Ra-226+   | 4.E-2           | 4.E-2           | 1.               | 4.E-2                | 4.E-2 | 1.  | 7.E-2                | 3.E-1 | 0.2 |
| Th-230  | 7.E-2           | 1.E-1           | 0.7              | 9.E+2                | 7.E+2 | 1.  | 7.E-2                | 1.E-1 | 0.7 |
| Th-232  | UL <sup>f</sup> | UL              | 1.               | UL                   | UL    | 1.  | UL                   | UL    | 1.  |
| U-232   | 6.E-2           | 3.E-2           | 2.               | 7.E-2                | 7.E-2 | 1.  | 6.E-2 <sup>f</sup>   | 3.E-2 | 2.  |
| U-235+  | 8.E-5           | 8.E-5           | 1.               | 8.E-5                | 8.E-5 | 1.  | 8E-5                 | 8.E-5 | 1.  |
| U-238   | UL              | UL              | 1.               | UL                   | UL    | 1.  | UL                   | UL    | 1.  |
| U natural                                       | UL              | ND <sup>c</sup> | -                | UL                   | ND    | -   | UL                   | ND    | -   |
| U empobrecido                                   | UL              | ND              | -                | UL                   | ND    | -   | UL                   | ND    | -   |
| U enriquecido > 20 %                            | 8E-5            | ND              | -                | 8E-5 <sup>g</sup>    | ND    | -   | 8E-5                 | ND    | -   |
| U enriquecido 10 % - 20%                        | 8E-4            | ND              | -                | 8E-4 <sup>g</sup>    | ND    | -   | 8E-4                 | ND    | -   |
| Np-237+   | 7.E-2           | 2.E-1           | 0.4              | 3.E-1                | 3.E-1 | 1.  | 7.E-2                | 2.E-1 | 0.4 |
| Pu-238  | 6.E-2           | 2.E-1           | 0.3              | 3.E+2                | 3.E+2 | 1.  | 6.E-2                | 2.E-1 | 0.3 |
| Pu-239  | 6.E-2           | 2.E-1           | 0.3              | 1.E+0                | 1.E+0 | 1.  | 6.E-2                | 2.E-1 | 0.3 |
| Pu-240  | 6.E-2           | 2.E-1           | 0.3              | 4.E+0                | 4.E+0 | 1.  | 6.E-2                | 2.E-1 | 0.3 |
| Pu-241+   | 3.E+0           | 2.E+1           | 0.2              | 2.E+3                | 2.E+3 | 1.  | 3.E+0                | 2.E+1 | 0.2 |
| Pu-242  | 7.E-2           | 7.E-2           | 1.               | 7.E-2                | 7.E-2 | 1.  | 7.E-2 <sup>g</sup>   | 7.E-2 | 1.  |
| Am-241  | 6.E-2           | 2.E-1           | 0.3              | 8.E+0                | 8.E+0 | 1.  | 6.E-2                | 2.E-1 | 0.3 |
| Cm-242  | 4.E-2           | 2.E-1           | 0.2              | 2.E+3                | 2.E+3 | 1.  | 4.E-2                | 2.E-1 | 0.2 |
| Cm-244  | 5.E-2           | 2.E-1           | 0.3              | 1.E+4                | 3.E+3 | 3.  | 5.E-2                | 2.E-1 | 0.3 |
| Cf-252  | 2.E-2           | 9.E-3           | 2.               | 2.E-2                | 9.E-3 | 2.  | 1.E-1                | 6.E-2 | 2.  |
| <sup>239</sup> Pu/ <sup>9</sup> Be <sup>d</sup> | 6.E-2           | 2.E-1           | 0.3              | 1.E+0 <sup>g</sup>   | 1.E+0 | 1.  | 6.E-2                | 2.E-1 | 0.3 |
| <sup>241</sup> Am/ <sup>9</sup> Be <sup>d</sup> | 6.E-2           | 2.E-1           | 0.3              | 1.E+0                | 5.E+0 | 0.2 | 6.E-2                | 2.E-1 | 0.3 |

<sup>a</sup> Al calcular los valores D para todos los radionucleidos se tuvo en cuenta el aumento interno de la progenie

radiactiva, como se expone en el Apéndice VIII. El símbolo '+' indica los radionucleidos en cuyo caso la progenie fue una fuente significativa de dosis para los escenarios considerados.

<sup>b</sup> "E" y "R" indican los enfoques experto y riesgo; "E/R" es la relación entre los valores D calculados mediante dichos enfoques.

<sup>c</sup> "UL" indica "cantidad ilimitada", definida en el Apéndice II. "ND" indica que "no hay datos".

<sup>d</sup> Generador de neutrones. La actividad presentada es la de un radionucleido emisor alfa, p. ej. el <sup>239</sup>Pu o el <sup>241</sup>Am.

### VII.3. EXPERIENCIA RESULTANTE DE EMERGENCIAS

En el Cuadro 25 se presenta un resumen de los datos esenciales publicados en informes relacionados con fuentes perdidas o robadas. También se incluye la relación entre la actividad presente en cada caso y el valor D<sub>1</sub> del radionucleido, A/D<sub>1</sub>. El cuadro no incluye un suceso en el que se dejó en una paciente durante 4 días una fuente de braquiterapia de <sup>192</sup>Ir, de 0.13 TBq, lo que le causó la muerte [59]. Probablemente la fuente no controlada más pequeña causante de una lesión que mermó la calidad de vida fue la presente en un suceso en el cual un padre colocó intencionadamente una fuente de <sup>137</sup>Cs en la cama y en los auriculares de su hijo durante un periodo de varias semanas a meses, y que provocó lesiones que precisaron cirugía y castración funcional [64]. El padre estaba autorizado para tener 4 Ci (0.14 TBq) de <sup>137</sup>Cs; sin embargo, es imposible determinar la cantidad exacta de material utilizado. La fuente más pequeña que accidentalmente causó heridas graves por exposición externa fue una fuente de <sup>137</sup>Cs, de 0.12 a 0.16 TBq [27]. Este valor era ligeramente superior al valor D<sub>1</sub> de 0.10 TBq para el <sup>137</sup>Cs del Cuadro 1. La fuente no controlada más pequeña que dio lugar a una exposición mortal entre la población fue una fuente con 1.2 TBq de <sup>192</sup>Ir [60], lo que representaba diez veces el valor D<sub>1</sub> aproximadamente. La única muerte por incorporación fue debida a la incorporación de 10<sup>-5</sup> de material muy dispersable de una fuente de <sup>137</sup>Cs [36]. Esta es la fracción de incorporación que se ha supuesto en el cálculo de los valores D<sub>2</sub>. Un examen de las emergencias en las que hubo muertes por exposición de todo el cuerpo mostró que la tasa de dosis en la médula roja a una distancia de un metro (escenario "habitación") fue probablemente del orden de 10 a 50 mGy/h durante el periodo de exposición. Tal dato se tuvo en cuenta en los criterios utilizados para este escenario (Escenario II). Por lo tanto, parece que los criterios relativos a la definición de fuentes peligrosas son coherentes con la experiencia práctica, y se sitúan en torno a una décima o una centésima parte del nivel al que se han observado dosis mortales en emergencias reales en las que hubo fuentes radiactivas no controladas.

CUADRO 25. RESUMEN DE EMERGENCIAS CON FUENTES PERDIDAS O ROBADAS

| Emergencia               | Emergencias |                      | D <sub>1</sub> <sup>a</sup> , TBq | A/D <sub>1</sub> | Consecuencias en la salud                                 |
|--------------------------|-------------|----------------------|-----------------------------------|------------------|---|
|                          | Fuente      | A <sup>b</sup> , TBq |                                   |                  |   |
| Estambul [61]            | Co-60       | 23.5                 | 0.03                              | 783              | Lesión grave, exposición con peligro de muerte            |
| Samut Prakarn [62]       | Co-60       | 15                   | 0.03                              | 500              | 3 muertes   |
| Goiânia [36]             | Cs-137      | 50                   | 0.1                               | 500              | 4 muertes   |
| Georgia GTR <sup>c</sup> | Sr-90       | 1000                 | 5                                 | 200              | 1 muerte, lesión grave y exposición con peligro de muerte |
| Tammiku [63]             | Cs-137      | 7.4                  | 0.1                               | 74               | 1 muerte  |
| Yanango [26, 31]         | Ir-192      | 1.37                 | 0.08                              | 17               | Lesión grave, exposición con peligro de muerte            |
| Caso 20 [60]             | Ir-192      | 1.2                  | 0.08                              | 13.8             | 8 muertes <sup>d</sup>                                    |
| China [64]               | Co-60       | 0.37                 | 0.03                              | 12               | 2 muertes <sup>e</sup>                                    |
| Argelia [64]             | Ir-192      | 0.97                 | 0.08                              | 11               | Exposición con peligro de muerte <sup>f</sup>             |
| EE. UU. [64]             | Ir-192      | 1                    | 0.08                              | 11               | Lesión grave  |
| Argelia [64]             | Ir-192      | 1                    | 0.08                              | 11               | Lesión grave  |
| Caso 43 [60]             | Ir-192      | 0.3                  | 0.08                              | 3.8              | Lesión grave  |
| Gilan [32]               | Ir-192      | 0.185                | 0.08                              | 2.3              | Lesión grave  |
| Caso 37 [60]             | Ir-192      | 0.26                 | 0.08                              | 3.3              | Lesión grave  |
| Japón [64]               | Ir-192      | 0.19                 | 0.08                              | 2.3              | Exposición con peligro de muerte <sup>g</sup>             |
| Lilo [27]                | Cs-137      | 0.12-0.16            | 0.1                               | 1.2-1.6          | Lesión grave  |

<sup>a</sup> D<sub>1</sub> para el radionucleido en cuestión del Cuadro 1.

- <sup>b</sup> Actividad (TBq) presente en la emergencia.
- <sup>c</sup> Dos personas quedaron expuestas; una de ellas murió año y medio después de la exposición.
- <sup>d</sup> Es posible que la fuente estuviera en la habitación hasta cuatro meses con una tasa de dosis probable comprendida entre 20 y 50 mSv/h a 1 m de la fuente.
- <sup>e</sup> La fuente se dejó en la habitación durante dos semanas y provocó una exposición mortal con una tasa de dosis de 50 mGy/h aproximadamente a 1 m de la fuente.
- <sup>f</sup> La fuente se dejó en la habitación durante cinco semanas pero no causó ninguna muerte. La tasa de dosis fue de unos 10 mGy/h a 1 m de la fuente.
- <sup>g</sup> La fuente permaneció en la habitación durante 6 días y fue manipulada.

## APÉNDICE VIII CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES RADIACTIVAS

En este Apéndice se describen las características nucleares básicas de los radionucleidos considerados. Estas características incluyen el periodo de semidesintegración, las constantes de desintegración y las actividades específicas de los radionucleidos, la producción de neutrones, los parámetros nucleares de emisores radiactivos de neutrones, las cadenas de desintegración radiactiva, la criticidad, los valores del límite de criticidad de la masa y la toxicidad química. También se incluye una explicación del enfoque utilizado para tratar la desintegración radiactiva, el aumento interno de la progenie y la criticidad.

### VIII.1. PERIODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDAD ESPECÍFICA

En el Cuadro 26 se presentan el periodo de semidesintegración ( $T_{1/2}$ ) y la actividad específica (denotada por su sigla en inglés SA) de cada uno de los radionucleidos de interés. Los valores del periodo de semidesintegración se tomaron de la Publicación 38 de la CIPR [38].

CUADRO 26. PERIODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN, CONSTANTES DE DESINTEGRACIÓN Y ACTIVIDADES ESPECÍFICAS

| Radio-nucleido | $T_{1/2}^a$ | $T_{1/2}$ | SA       |
|----------------|-------------|-----------|----------|
|                |             | (s)       | (Bq/g)   |
| H-3            | 12.3 a      | 3.88E+08  | 3.59E+14 |
| Be-7           | 53.3 d      | 4.61E+06  | 1.29E+16 |
| Be-10          | 1.60E+6 a   | 5.05E+13  | 8.27E+08 |
| C-11           | 20.38 min   | 1.22E+03  | 3.10E+19 |
| C-14           | 5.73E+3 a   | 1.81E+11  | 1.65E+11 |
| N-13           | 9.965 min   | 5.98E+02  | 5.37E+19 |
| F-18           | 109.77 min  | 6.59E+03  | 3.52E+18 |
| Na-22          | 2.60 a      | 8.20E+07  | 2.31E+14 |
| Na-24          | 15.00 h     | 5.40E+04  | 3.22E+17 |
| Mg-28          | 20.91 h     | 7.53E+04  | 1.98E+17 |
| Al-26          | 7.16E+5 a   | 2.26E+13  | 7.11E+08 |
| Si-31          | 157.3 min   | 9.44E+03  | 1.43E+18 |
| Si-32          | 4.50E+2 a   | 1.42E+10  | 9.19E+11 |
| P-32           | 14.3 d      | 1.24E+06  | 1.06E+16 |
| P-33           | 25.4 d      | 2.19E+06  | 5.76E+15 |
| S-35           | 87.4 d      | 7.55E+06  | 1.58E+15 |
| Cl-36          | 3.01E+5 a   | 9.49E+12  | 1.22E+09 |
| Cl-38          | 37.21 min   | 2.23E+03  | 4.92E+18 |
| Ar-37          | 35.02d      | 3.03E+06  | 3.73E+15 |
| Ar-39          | 269 a       | 8.48E+09  | 1.26E+12 |
| Ar-41          | 1.827 h     | 6.58E+03  | 1.55E+18 |
| K-40           | 1.28E+9 a   | 4.04E+16  | 2.58E+05 |
| K-42           | 12.36 h     | 4.45E+04  | 2.23E+17 |
| K-43           | 22.6 h      | 8.14E+04  | 1.19E+17 |
| Ca-41          | 1.40E+5 a   | 4.42E+12  | 2.31E+09 |
| Ca-45          | 163 d       | 1.41E+07  | 6.58E+14 |
| Ca-47          | 4.53 d      | 3.91E+05  | 2.27E+16 |
| Sc-44          | 3.927 h     | 1.41E+04  | 6.71E+17 |

| Radio-nucleido | T <sub>1/2</sub> <sup>a</sup> | T <sub>1/2</sub> | SA       |
|----------------|-------------------------------|------------------|----------|
|                |                               | (s)              | (Bq/g)   |
| Sc-46          | 83.8 d                        | 7.24E+06         | 1.25E+15 |
| Sc-47          | 3.35 d                        | 2.89E+05         | 3.07E+16 |
| Sc-48          | 1.82 d                        | 1.57E+05         | 5.53E+16 |
| Ti-44          | 47.3 a                        | 1.49E+09         | 6.36E+12 |
| V-48           | 16.2 d                        | 1.40E+06         | 6.21E+15 |
| V-49           | 330 d                         | 2.85E+07         | 2.99E+14 |
| Cr-51          | 27.7 d                        | 2.39E+06         | 3.42E+15 |
| Mn-52          | 5.59 d                        | 4.83E+05         | 1.66E+16 |
| Mn-53          | 3.70E+6 a                     | 1.17E+14         | 6.75E+07 |
| Mn-54          | 312 d                         | 2.70E+07         | 2.87E+14 |
| Mn-56          | 2.5785 h                      | 9.28E+03         | 8.03E+17 |
| Fe-52          | 8.28 h                        | 2.98E+04         | 2.69E+17 |
| Fe-55          | 2.70 a                        | 8.51E+07         | 8.91E+13 |
| Fe-59          | 44.5 d                        | 3.84E+06         | 1.84E+15 |
| Fe-60          | 1.00E+5 a                     | 3.15E+12         | 2.21E+09 |
| Co-55          | 17.54 h                       | 6.31E+04         | 1.20E+17 |
| Co-56          | 78.7 d                        | 6.80E+06         | 1.10E+15 |
| Co-57          | 271 d                         | 2.34E+07         | 3.13E+14 |
| Co-58          | 70.8 d                        | 6.12E+06         | 1.18E+15 |
| Co-58m         | 9.15 h                        | 3.29E+04         | 2.18E+17 |
| Co-60          | 5.27 a                        | 1.66E+08         | 4.18E+13 |
| Ni-59          | 7.50E+4 a                     | 2.37E+12         | 2.99E+09 |
| Ni-63          | 96.0 a                        | 3.03E+09         | 2.19E+12 |
| Ni-65          | 2.520 h                       | 9.07E+03         | 7.08E+17 |
| Cu-64          | 12.701 h                      | 4.57E+04         | 1.43E+17 |
| Cu-67          | 2.58 d                        | 2.23E+05         | 2.79E+16 |
| Zn-65          | 244 d                         | 2.11E+07         | 3.05E+14 |
| Zn-69          | 57 min                        | 3.42E+03         | 1.77E+18 |
| Zn-69m         | 13.76 h                       | 4.95E+04         | 1.22E+17 |
| Ga-67          | 3.26 d                        | 2.82E+05         | 2.21E+16 |
| Ga-68          | 68.0 min                      | 4.08E+03         | 1.50E+18 |
| Ga-72          | 14.1 h                        | 5.08E+04         | 1.14E+17 |
| Ge-68          | 288 d                         | 2.49E+07         | 2.47E+14 |
| Ge-71          | 11.8 d                        | 1.02E+06         | 5.76E+15 |
| Ge-77          | 11.3 h                        | 4.07E+04         | 1.33E+17 |
| As-72          | 1.08 d                        | 9.33E+04         | 6.21E+16 |
| As-73          | 80.3 d                        | 6.94E+06         | 8.24E+14 |
| As-74          | 17.8 d                        | 1.54E+06         | 3.67E+15 |
| As-76          | 1.10 d                        | 9.50E+04         | 5.78E+16 |
| As-77          | 1.62 d                        | 1.40E+05         | 3.87E+16 |
| Se-75          | 120 d                         | 1.04E+07         | 5.37E+14 |
| Se-79          | 6.50E+4 a                     | 2.05E+12         | 2.58E+09 |
| Br-76          | 16.2 h                        | 5.83E+04         | 9.41E+16 |
| Br-77          | 2.33 d                        | 2.01E+05         | 2.69E+16 |

| Radio-nucleido | T <sub>1/2</sub> <sup>a</sup> | T <sub>1/2</sub> | SA       |
|----------------|-------------------------------|------------------|----------|
|                |                               | (s)              | (Bq/g)   |
| Br-82          | 1.47 d                        | 1.27E+05         | 4.01E+16 |
| Kr-81          | 2.1E5 a                       | 6.62E+12         | 7.78E+08 |
| Kr-85          | 10.72 a                       | 3.38E+08         | 1.45E+13 |
| Kr-85m         | 4.48 h                        | 1.61E+04         | 3.04E+17 |
| Kr-87          | 76.3 min                      | 4.58E+03         | 1.05E+18 |
| Rb-81          | 4.58 h                        | 1.65E+04         | 3.12E+17 |
| Rb-83          | 86.2 d                        | 7.45E+06         | 6.75E+14 |
| Rb-84          | 32.8 d                        | 2.83E+06         | 1.75E+15 |
| Rb-86          | 18.6 d                        | 1.61E+06         | 3.02E+15 |
| Rb-87          | 4.7E+10 a                     | 1.48E+18         | 3.24E+03 |
| Sr-82          | 25.0 d                        | 2.16E+06         | 2.36E+15 |
| Sr-85          | 64.8 d                        | 5.60E+06         | 8.77E+14 |
| Sr-85m         | 1.16 h                        | 4.18E+03         | 1.18E+18 |
| Sr-87m         | 2.805 h                       | 1.01E+04         | 4.75E+17 |
| Sr-89          | 50.5 d                        | 4.36E+06         | 1.07E+15 |
| Sr-90          | 29.1 a                        | 9.18E+08         | 5.05E+12 |
| Sr-91          | 9.50 h                        | 3.42E+04         | 1.34E+17 |
| Sr-92          | 2.71 h                        | 9.76E+03         | 4.65E+17 |
| Y-87           | 3.35 d                        | 2.89E+05         | 1.66E+16 |
| Y-88           | 107 d                         | 9.24E+06         | 5.13E+14 |
| Y-90           | 2.67 d                        | 2.31E+05         | 2.01E+16 |
| Y-91           | 58.5 d                        | 5.05E+06         | 9.07E+14 |
| Y-91m          | 0.828 h                       | 2.98E+03         | 1.54E+18 |
| Y-92           | 3.54 h                        | 1.27E+04         | 3.56E+17 |
| Y-93           | 10.1 h                        | 3.64E+04         | 1.23E+17 |
| Zr-88          | 83.4 d                        | 7.21E+06         | 6.58E+14 |
| Zr-93          | 1.53E+6 a                     | 4.83E+13         | 9.30E+07 |
| Zr-95          | 64.0 d                        | 5.53E+06         | 7.94E+14 |
| Zr-97          | 16.90 h                       | 6.08E+04         | 7.07E+16 |
| Nb-93m         | 13.6 a                        | 4.29E+08         | 1.05E+13 |
| Nb-94          | 2.03E+4 a                     | 6.40E+11         | 6.93E+09 |
| Nb-95          | 35.1 d                        | 3.03E+06         | 1.45E+15 |
| Nb-97          | 72.1 min                      | 4.33E+03         | 9.94E+17 |
| Mo-93          | 3.50E+3 a                     | 1.10E+11         | 4.07E+10 |
| Mo-99          | 2.75 d                        | 2.38E+05         | 1.77E+16 |
| Tc-95m         | 61.0 d                        | 5.27E+06         | 8.33E+14 |
| Tc-96          | 4.28 d                        | 3.70E+05         | 1.18E+16 |
| Tc-96m         | 0.858 h                       | 3.09E+03         | 1.41E+18 |
| Tc-97          | 2.60E+6 a                     | 8.20E+13         | 5.25E+07 |
| Tc-97m         | 87.0 d                        | 7.52E+06         | 5.72E+14 |
| Tc-98          | 4.20E+6 a                     | 1.32E+14         | 3.21E+07 |
| Tc-99          | 2.13E+5 a                     | 6.72E+12         | 6.27E+08 |
| Tc-99m         | 6.02 h                        | 2.17E+04         | 1.94E+17 |
| Ru-97          | 2.90 d                        | 2.51E+05         | 1.72E+16 |
| Ru-103         | 39.3 d                        | 3.40E+06         | 1.19E+15 |

| Radio-nucleido | T <sub>1/2</sub> <sup>a</sup> | T <sub>1/2</sub> | SA       |
|----------------|-------------------------------|------------------|----------|
|                |                               | (s)              | (Bq/g)   |
| Ru-105         | 4.44 h                        | 1.60E+04         | 2.49E+17 |
| Ru-106         | 1.01 a                        | 3.19E+07         | 1.24E+14 |
| Rh-99          | 16.0 d                        | 1.38E+06         | 3.05E+15 |
| Rh-101         | 3.20 a                        | 1.01E+08         | 4.09E+13 |
| Rh-102         | 2.90 a                        | 9.15E+07         | 4.47E+13 |
| Rh-102m        | 207 d                         | 1.79E+07         | 2.29E+14 |
| Rh-103m        | 56.12 min                     | 3.37E+03         | 1.20E+18 |
| Rh-105         | 1.47 d                        | 1.27E+05         | 3.13E+16 |
| Pd-103         | 17.0 d                        | 1.47E+06         | 2.76E+15 |
| Pd-107         | 6.50E+6 a                     | 2.05E+14         | 1.90E+07 |
| Pd-109         | 13.427 h                      | 4.83E+04         | 7.92E+16 |
| Ag-105         | 41.0 d                        | 3.54E+06         | 1.12E+15 |
| Ag-108m        | 1.27E+2 a                     | 4.01E+09         | 9.65E+11 |
| Ag-110m        | 250 d                         | 2.16E+07         | 1.76E+14 |
| Ag-111         | 7.45 d                        | 6.44E+05         | 5.84E+15 |
| Cd-109         | 1.27 a                        | 4.01E+07         | 9.56E+13 |
| Cd-113m        | 13.6 a                        | 4.29E+08         | 8.61E+12 |
| Cd-115         | 2.23 d                        | 1.93E+05         | 1.88E+16 |
| Cd-115m        | 44.6 d                        | 3.85E+06         | 9.42E+14 |
| In-111         | 2.83 d                        | 2.45E+05         | 1.54E+16 |
| In-113m        | 1.658 h                       | 5.97E+03         | 6.19E+17 |
| In-114m        | 49.5 d                        | 4.28E+06         | 8.56E+14 |
| In-115m        | 4.486 h                       | 1.61E+04         | 2.25E+17 |
| Sn-113         | 115 d                         | 9.94E+06         | 3.72E+14 |
| Sn-117m        | 13.6 d                        | 1.18E+06         | 3.04E+15 |
| Sn-119m        | 293 d                         | 2.53E+07         | 1.39E+14 |
| Sn-121m        | 55.0 a                        | 1.73E+09         | 1.99E+12 |
| Sn-123         | 129 d                         | 1.11E+07         | 3.04E+14 |
| Sn-125         | 9.64 d                        | 8.33E+05         | 4.01E+15 |
| Sn-126         | 1.00E+5 a                     | 3.15E+12         | 1.05E+09 |
| Sb-122         | 2.70 d                        | 2.33E+05         | 1.47E+16 |
| Sb-124         | 60.2 d                        | 5.20E+06         | 6.47E+14 |
| Sb-125         | 2.77 a                        | 8.74E+07         | 3.82E+13 |
| Sb-126         | 12.4 d                        | 1.07E+06         | 3.09E+15 |
| Te-121         | 17.0 d                        | 1.47E+06         | 2.35E+15 |
| Te-121m        | 154 d                         | 1.33E+07         | 2.59E+14 |
| Te-123m        | 120 d                         | 1.04E+07         | 3.27E+14 |
| Te-125m        | 58.0 d                        | 5.01E+06         | 6.66E+14 |
| Te-127         | 9.35 h                        | 3.37E+04         | 9.76E+16 |
| Te-127m        | 109 d                         | 9.42E+06         | 3.49E+14 |
| Te-129         | 69.6 min                      | 4.18E+03         | 7.75E+17 |
| Te-129m        | 33.6 d                        | 2.90E+06         | 1.11E+15 |
| Te-131m        | 1.25 d                        | 1.08E+05         | 2.95E+16 |
| Te-132         | 3.26 d                        | 2.82E+05         | 1.12E+16 |

| Radio-nucleido | $T_{1/2}^a$ | $T_{1/2}$<br>(s) | SA<br>(Bq/g) |
|----------------|-------------|------------------|--------------|
| I-123          | 13.2 h      | 4.75E+04         | 7.14E+16     |
| I-124          | 4.18 d      | 3.61E+05         | 9.32E+15     |
| I-125          | 60.1 d      | 5.19E+06         | 6.43E+14     |
| I-126          | 13.0 d      | 1.12E+06         | 2.95E+15     |
| I-129          | 1.57E+7 a   | 4.95E+14         | 6.53E+06     |
| I-131          | 8.04 d      | 6.95E+05         | 4.59E+15     |
| I-132          | 2.30 h      | 8.28E+03         | 3.82E+17     |
| I-133          | 20.8 h      | 7.49E+04         | 4.19E+16     |
| I-134          | 52.6 min    | 3.16E+03         | 9.87E+17     |
| I-135          | 6.61 h      | 2.38E+04         | 1.30E+17     |
| Xe-122         | 20.1 h      | 7.24E+04         | 4.73E+16     |
| Xe-123         | 2.08 h      | 7.49E+03         | 4.53E+17     |
| Xe-127         | 36.41d      | 3.15E+06         | 1.04E+15     |
| Xe-131m        | 11.9d       | 1.03E+06         | 3.10E+15     |
| Xe-133         | 5.245d      | 4.53E+05         | 6.92E+15     |
| Xe-135         | 9.09 h      | 3.27E+04         | 9.45E+16     |
| Cs-129         | 1.34 d      | 1.16E+05         | 2.79E+16     |
| Cs-131         | 9.69 d      | 8.37E+05         | 3.80E+15     |
| Cs-132         | 6.48 d      | 5.60E+05         | 5.65E+15     |
| Cs-134         | 2.06 a      | 6.50E+07         | 4.79E+13     |
| Cs-134m        | 2.90 h      | 1.04E+04         | 2.98E+17     |
| Cs-135         | 2.30E+6 a   | 7.25E+13         | 4.26E+07     |
| Cs-136         | 13.1 d      | 1.13E+06         | 2.71E+15     |
| Cs-137         | 30.0 a      | 9.46E+08         | 3.22E+12     |
| Ba-131         | 11.8 d      | 1.02E+06         | 3.12E+15     |
| Ba-133         | 10.7 a      | 3.37E+08         | 9.30E+12     |
| Ba-133m        | 1.62 d      | 1.40E+05         | 2.24E+16     |
| Ba-140         | 12.7 d      | 1.10E+06         | 2.72E+15     |
| La-137         | 6.00E+4 a   | 1.89E+12         | 1.61E+09     |
| La-140         | 1.68 d      | 1.45E+05         | 2.05E+16     |
| Ce-139         | 138 d       | 1.19E+07         | 2.52E+14     |
| Ce-141         | 32.5 d      | 2.81E+06         | 1.05E+15     |
| Ce-143         | 1.38 d      | 1.19E+05         | 2.45E+16     |
| Ce-144         | 284 d       | 2.45E+07         | 1.18E+14     |
| Pr-142         | 19.13 h     | 6.89E+04         | 4.27E+16     |
| Pr-143         | 13.6 d      | 1.18E+06         | 2.48E+15     |
| Nd-147         | 11.0 d      | 9.50E+05         | 2.99E+15     |
| Nd-149         | 1.73 h      | 6.23E+03         | 4.50E+17     |
| Pm-143         | 265 d       | 2.29E+07         | 1.27E+14     |
| Pm-144         | 363 d       | 3.14E+07         | 9.24E+13     |
| Pm-145         | 17.7 a      | 5.58E+08         | 5.16E+12     |
| Pm-147         | 2.62 a      | 8.26E+07         | 3.44E+13     |
| Pm-148m        | 41.3 d      | 3.57E+06         | 7.90E+14     |
| Pm-149         | 2.21 d      | 1.91E+05         | 1.47E+16     |
| Pm-151         | 1.18 d      | 1.02E+05         | 2.71E+16     |

| Radio-nucleido | T <sub>1/2</sub> <sup>a</sup> | T <sub>1/2</sub> | SA       |
|----------------|-------------------------------|------------------|----------|
|                |                               | (s)              | (Bq/g)   |
| Sm-145         | 340 d                         | 2.94E+07         | 9.80E+13 |
| Sm-147         | 1.1E+11 a                     | 3.34E+18         | 8.49E+02 |
| Sm-151         | 90.0 a                        | 2.84E+09         | 9.74E+11 |
| Sm-153         | 1.95 d                        | 1.68E+05         | 1.62E+16 |
| Eu-147         | 24.0 d                        | 2.07E+06         | 1.37E+15 |
| Eu-148         | 54.5 d                        | 4.71E+06         | 5.99E+14 |
| Eu-149         | 93.1 d                        | 8.04E+06         | 3.48E+14 |
| Eu-150a        | 12.62 h                       | 4.54E+04         | 6.12E+16 |
| Eu-150b        | 34.2 a                        | 1.08E+09         | 2.58E+12 |
| Eu-152         | 13.3 a                        | 4.19E+08         | 6.55E+12 |
| Eu-152m        | 9.32 h                        | 3.36E+04         | 8.18E+16 |
| Eu-154         | 8.80 a                        | 2.78E+08         | 9.76E+12 |
| Eu-155         | 4.96 a                        | 1.56E+08         | 1.72E+13 |
| Eu-156         | 15.2 d                        | 1.31E+06         | 2.04E+15 |
| Gd-146         | 48.3 d                        | 4.17E+06         | 6.85E+14 |
| Gd-148         | 93.0 a                        | 2.93E+09         | 9.61E+11 |
| Gd-153         | 242 d                         | 2.09E+07         | 1.30E+14 |
| Gd-159         | 18.56 h                       | 6.68E+04         | 3.93E+16 |
| Tb-157         | 1.50E+2 a                     | 4.73E+09         | 5.62E+11 |
| Tb-158         | 1.50E+2 a                     | 4.73E+09         | 5.58E+11 |
| Tb-160         | 72.3 d                        | 6.25E+06         | 4.17E+14 |
| Dy-159         | 144 d                         | 1.24E+07         | 2.11E+14 |
| Dy-165         | 2.334 h                       | 8.40E+03         | 3.01E+17 |
| Dy-166         | 3.40 d                        | 2.94E+05         | 8.56E+15 |
| Ho-166         | 1.12 d                        | 9.68E+04         | 2.60E+16 |
| Ho-166m        | 1.20E+3 a                     | 3.78E+10         | 6.64E+10 |
| Er-169         | 9.30 d                        | 8.04E+05         | 3.07E+15 |
| Er-171         | 7.52 h                        | 2.71E+04         | 9.01E+16 |
| Tm-167         | 9.24 d                        | 7.98E+05         | 3.13E+15 |
| Tm-170         | 129 d                         | 1.11E+07         | 2.20E+14 |
| Tm-171         | 1.92 a                        | 6.05E+07         | 4.03E+13 |
| Yb-169         | 32.0 d                        | 2.76E+06         | 8.93E+14 |
| Yb-175         | 4.19 d                        | 3.62E+05         | 6.59E+15 |
| Lu-172         | 6.70 d                        | 5.79E+05         | 4.19E+15 |
| Lu-173         | 1.37 a                        | 4.32E+07         | 5.58E+13 |
| Lu-174         | 3.31 a                        | 1.04E+08         | 2.30E+13 |
| Lu-174m        | 142 d                         | 1.23E+07         | 1.95E+14 |
| Lu-177         | 6.71 d                        | 5.80E+05         | 4.07E+15 |
| Hf-172         | 1.87 a                        | 5.90E+07         | 4.11E+13 |
| Hf-175         | 70.0 d                        | 6.05E+06         | 3.94E+14 |
| Hf-181         | 42.4 d                        | 3.66E+06         | 6.29E+14 |
| Hf-182         | 9.00E+6 a                     | 2.84E+14         | 8.08E+06 |
| Ta-178b        | 2.2 h                         | 7.92E+03         | 2.96E+17 |
| Ta-179         | 1.82 a                        | 5.74E+07         | 4.06E+13 |

| Radio-nucleido | T <sub>1/2</sub> <sup>a</sup> | T <sub>1/2</sub> | SA       |
|----------------|-------------------------------|------------------|----------|
|                |                               | (s)              | (Bq/g)   |
| Ta-182         | 115 d                         | 9.94E+06         | 2.31E+14 |
| W-178          | 21.7 d                        | 1.87E+06         | 1.25E+15 |
| W-181          | 121 d                         | 1.05E+07         | 2.21E+14 |
| W-185          | 75.1 d                        | 6.49E+06         | 3.48E+14 |
| W-187          | 23.9 h                        | 8.60E+04         | 2.59E+16 |
| W-188          | 69.4 d                        | 6.00E+06         | 3.70E+14 |
| Re-184         | 38.0 d                        | 3.28E+06         | 6.91E+14 |
| Re-184m        | 165 d                         | 1.43E+07         | 1.59E+14 |
| Re-186         | 3.78 d                        | 3.27E+05         | 6.87E+15 |
| Re-187         | 5.0E+10 a                     | 1.58E+18         | 1.42E+03 |
| Re-188         | 16.98 h                       | 6.11E+04         | 3.63E+16 |
| Re-189         | 1.01 d                        | 8.73E+04         | 2.53E+16 |
| Os-185         | 94.0 d                        | 8.12E+06         | 2.78E+14 |
| Os-191         | 15.4 d                        | 1.33E+06         | 1.64E+15 |
| Os-191m        | 13.0 h                        | 4.68E+04         | 4.67E+16 |
| Os-193         | 1.25 d                        | 1.08E+05         | 2.00E+16 |
| Os-194         | 6.00 a                        | 1.89E+08         | 1.14E+13 |
| Ir-189         | 13.3 d                        | 1.15E+06         | 1.92E+15 |
| Ir-190         | 12.1 d                        | 1.05E+06         | 2.10E+15 |
| Ir-192         | 74.0 d                        | 6.39E+06         | 3.40E+14 |
| Ir-194         | 19.15 h                       | 6.89E+04         | 3.12E+16 |
| Pt-188         | 10.2 d                        | 8.81E+05         | 2.52E+15 |
| Pt-191         | 2.80 d                        | 2.42E+05         | 9.03E+15 |
| Pt-193         | 50.0 a                        | 1.58E+09         | 1.37E+12 |
| Pt-193m        | 4.33 d                        | 3.74E+05         | 5.78E+15 |
| Pt-195m        | 4.02 d                        | 3.47E+05         | 6.16E+15 |
| Pt-197         | 18.3 h                        | 6.59E+04         | 3.22E+16 |
| Pt-197m        | 94.4 min                      | 5.66E+03         | 3.74E+17 |
| Au-193         | 17.6 h                        | 6.34E+04         | 3.41E+16 |
| Au-194         | 1.64 d                        | 1.42E+05         | 1.52E+16 |
| Au-195         | 183 d                         | 1.58E+07         | 1.35E+14 |
| Au-198         | 2.69 d                        | 2.32E+05         | 9.07E+15 |
| Au-199         | 3.14 d                        | 2.71E+05         | 7.73E+15 |
| Hg-194         | 2.60E+2 a                     | 8.20E+09         | 2.62E+11 |
| Hg-195m        | 1.73 d                        | 1.49E+05         | 1.43E+16 |
| Hg-197         | 2.67 d                        | 2.31E+05         | 9.18E+15 |
| Hg-197m        | 23.8 h                        | 8.57E+04         | 2.47E+16 |
| Hg-203         | 46.6 d                        | 4.03E+06         | 5.11E+14 |
| Tl-200         | 1.09 d                        | 9.42E+04         | 2.22E+16 |
| Tl-201         | 3.04 d                        | 2.63E+05         | 7.90E+15 |
| Tl-202         | 12.2 d                        | 1.05E+06         | 1.96E+15 |
| Tl-204         | 3.78 a                        | 1.19E+08         | 1.72E+13 |
| Pb-201         | 9.40 h                        | 3.38E+04         | 6.13E+16 |
| Pb-202         | 3.00E+5 a                     | 9.46E+12         | 2.18E+08 |
| Pb-203         | 2.17 d                        | 1.87E+05         | 1.10E+16 |

| Radio-nucleido | T <sub>1/2</sub> <sup>a</sup> | T <sub>1/2</sub> | SA       |
|----------------|-------------------------------|------------------|----------|
|                |                               | (s)              | (Bq/g)   |
| Pb-205         | 1.43E+7 a                     | 4.51E+14         | 4.51E+06 |
| Pb-210         | 22.3 a                        | 7.03E+08         | 2.83E+12 |
| Pb-212         | 10.64 h                       | 3.83E+04         | 5.14E+16 |
| Bi-205         | 15.3 d                        | 1.32E+06         | 1.54E+15 |
| Bi-206         | 6.24 d                        | 5.39E+05         | 3.76E+15 |
| Bi-207         | 38.0 a                        | 1.20E+09         | 1.68E+12 |
| Bi-210         | 5.01 d                        | 4.33E+05         | 4.59E+15 |
| Bi-210m        | 3.00E+6 a                     | 9.46E+13         | 2.10E+07 |
| Bi-212         | 60.55 min                     | 3.63E+03         | 5.42E+17 |
| Po-210         | 138 d                         | 1.19E+07         | 1.67E+14 |
| At-211         | 7.21 h                        | 2.60E+04         | 7.62E+16 |
| Rn-222         | 3.8235d                       | 3.30E+05         | 5.69E+15 |
| Ra-223         | 11.4 d                        | 9.85E+05         | 1.90E+15 |
| Ra-224         | 3.66 d                        | 3.16E+05         | 5.89E+15 |
| Ra-225         | 14.8 d                        | 1.28E+06         | 1.45E+15 |
| Ra-226         | 1.60E+3 a                     | 5.05E+10         | 3.66E+10 |
| Ra-228         | 5.75 a                        | 1.81E+08         | 1.01E+13 |
| Ac-225         | 10.0 d                        | 8.64E+05         | 2.15E+15 |
| Ac-227         | 21.8 a                        | 6.87E+08         | 2.67E+12 |
| Ac-228         | 6.13 h                        | 2.21E+04         | 8.29E+16 |
| Th-227         | 18.7 d                        | 1.62E+06         | 1.14E+15 |
| Th-228         | 1.91 a                        | 6.02E+07         | 3.04E+13 |
| Th-229         | 7.34E+3 a                     | 2.31E+11         | 7.87E+09 |
| Th-230         | 7.70E+4 a                     | 2.43E+12         | 7.47E+08 |
| Th-231         | 1.06 d                        | 9.16E+04         | 1.97E+16 |
| Th-232         | 1.4E+10 a                     | 4.42E+17         | 4.07E+03 |
| Th-234         | 24.1 d                        | 2.08E+06         | 8.56E+14 |
| Pa-230         | 17.4 d                        | 1.50E+06         | 1.21E+15 |
| Pa-231         | 3.27E+4 a                     | 1.03E+12         | 1.75E+09 |
| Pa-233         | 27.0 d                        | 2.33E+06         | 7.68E+14 |
| U-230          | 20.8 d                        | 1.80E+06         | 1.01E+15 |
| U-232          | 72.0 a                        | 2.27E+09         | 7.92E+11 |
| U-233          | 1.58E+5 a                     | 4.98E+12         | 3.59E+08 |
| U-234          | 2.44E+5 a                     | 7.69E+12         | 2.32E+08 |
| U-235          | 7.04E+8 a                     | 2.22E+16         | 8.00E+04 |
| U-236          | 2.34E+7 a                     | 7.38E+14         | 2.40E+06 |
| U-238          | 4.47E+9 a                     | 1.41E+17         | 1.24E+04 |
| Np-235         | 1.08 a                        | 3.41E+07         | 5.21E+13 |
| Np-236b        | 1.15E+5 a                     | 3.63E+12         | 4.88E+08 |
| Np-236a        | 22.5 h                        | 8.10E+04         | 2.18E+16 |
| Np-237         | 2.14E+6 a                     | 6.75E+13         | 2.61E+07 |
| Np-239         | 2.36 d                        | 2.04E+05         | 8.56E+15 |
| Pu-236         | 2.85 a                        | 8.99E+07         | 1.97E+13 |
| Pu-237         | 45.3 d                        | 3.91E+06         | 4.50E+14 |

| Radio-nucleido | T <sub>1/2</sub> <sup>a</sup> | T <sub>1/2</sub><br>(s) | SA<br>(Bq/g) |
|----------------|-------------------------------|-------------------------|--------------|
| Pu-238         | 87.7 a                        | 2.77E+09                | 6.34E+11     |
| Pu-239         | 2.41E+4 a                     | 7.60E+11                | 2.30E+09     |
| Pu-240         | 6.54E+3 a                     | 2.06E+11                | 8.43E+09     |
| Pu-241         | 14.4 a                        | 4.54E+08                | 3.81E+12     |
| Pu-242         | 3.76E+5 a                     | 1.19E+13                | 1.45E+08     |
| Pu-244         | 8.26E+7 a                     | 2.60E+15                | 6.57E+05     |
| Am-241         | 4.32E+2 a                     | 1.36E+10                | 1.27E+11     |
| Am-242m        | 1.52E+2 a                     | 4.79E+09                | 3.60E+11     |
| Am-243         | 7.38E+3 a                     | 2.33E+11                | 7.38E+09     |
| Am-244         | 10.1 h                        | 3.64E+04                | 4.70E+16     |
| Cm-240         | 27.0 d                        | 2.33E+06                | 7.45E+14     |
| Cm-241         | 32.8 d                        | 2.83E+06                | 6.11E+14     |
| Cm-242         | 163 d                         | 1.41E+07                | 1.22E+14     |
| Cm-243         | 28.5 a                        | 8.99E+08                | 1.91E+12     |
| Cm-244         | 18.1 a                        | 5.71E+08                | 3.00E+12     |
| Cm-245         | 8.50E+3 a                     | 2.68E+11                | 6.35E+09     |
| Cm-246         | 4.73E+3 a                     | 1.49E+11                | 1.14E+10     |
| Cm-247         | 1.56E+7 a                     | 4.92E+14                | 3.43E+06     |
| Cm-248         | 3.39E+5 a                     | 1.07E+13                | 1.57E+08     |
| Bk-247         | 1.38E+3 a                     | 4.35E+10                | 3.88E+10     |
| Bk-249         | 320 d                         | 2.76E+07                | 6.06E+13     |
| Cf-248         | 334 d                         | 2.89E+07                | 5.83E+13     |
| Cf-249         | 3.50E+2 a                     | 1.10E+10                | 1.52E+11     |
| Cf-250         | 13.1 a                        | 4.13E+08                | 4.04E+12     |
| Cf-251         | 8.98E+2 a                     | 2.83E+10                | 5.87E+10     |
| Cf-252         | 2.64 a                        | 8.33E+07                | 1.99E+13     |
| Cf-253         | 17.8 d                        | 1.54E+06                | 1.07E+15     |
| Cf-254         | 60.5 d                        | 5.23E+06                | 3.14E+14     |

<sup>a</sup> años (a), días (d), horas (h) y minutos (min).

## VIII.2. PRODUCCIÓN DE NEUTRONES

Generalmente, los materiales radiactivos que emiten neutrones lo hacen como resultado de una fisión espontánea o de la reacción ( $\alpha$ , n). Los emisores de neutrones podrían plantear peligros tanto internos como externos. En el caso de incorporación de material dispersado que contenga radionucleidos que fisión espontáneamente se utilizaron los factores de conversión de dosis de las Refs. [49, 50], y se consideraron también la dosis interna debida a los neutrones inmediatos y diferidos, los fotones y las partículas beta originados por la fisión. Los rendimientos de neutrones de las fuentes ( $\alpha$ , n) dependen de su forma física y composición. El rendimiento es máximo para el material sólido y despreciable para una fuente dispersada. En consecuencia, después de la dispersión, una fuente así se convierte en una mezcla de granos emisores alfa con un rendimiento de neutrones despreciable. Entonces presenta el mismo peligro interno que el material dispersado emisor alfa que es parte de la fuente. En ambos enfoques, experto y riesgo, los materiales radiactivos emisores de neutrones se tratan como una fuente especial de exposición externa.

En el enfoque experto se supuso para las fuentes de  $^{239}\text{Pu}/^9\text{Be}$  y de  $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$  un rendimiento de neutrones (originados por la reacción ( $\alpha$ , n)) igual a  $6.0 \times 10^{-5}$  neutrón/(Bqxs) [47] y los factores de

conversión de dosis se calcularon como se indica en el Apéndice IV. Para el  $^{252}\text{Cf}$  (fisión espontánea) se utilizó el factor de conversión de tasa de dosis externa de la Ref. [46].

En el Cuadro 27 figuran los rendimientos de las fuentes de neutrones que se utilizaron en el enfoque riesgo. En este enfoque se consideraron los radionucleidos de fisión espontánea  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{250}\text{Cf}$ ,  $^{252}\text{Cf}$  y  $^{254}\text{Cf}$ . Los distintos núcleos tienen diferentes espectros de energía de los neutrones de fisión; sin embargo, en el caso del  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{250}\text{Cf}$ ,  $^{252}\text{Cf}$  y  $^{254}\text{Cf}$  estas diferencias son tan pequeñas que no dan lugar a diferencias significativas en los factores de conversión de dosis. En consecuencia, se utilizó sin modificarlo el espectro de energía de los neutrones de fisión del  $^{252}\text{Cf}$  de la Ref. [48] para estimar los factores de conversión de dosis de todos los radionucleidos de fisión espontánea. Como se señala en la Ref. [65], tras la fisión espontánea se emiten también fotones inmediatos y diferidos, y partículas beta. Estas radiaciones son transportadoras de una parte importante de la energía de fisión espontánea y constituyen también un peligro externo. Las fuentes de  $^{239}\text{Pu}/^9\text{Be}$  y  $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$  emiten neutrones producto de la reacción ( $\alpha$ , n) con el berilio. Esta reacción del  $^9\text{Be}$  da lugar a la emisión de fotones de 4.4 MeV con una relación fotón-neutrón entre 0.6 y 1 [66]. El espectro de energía de los neutrones que se producen en una reacción ( $\alpha$ , n) depende de la energía de la partícula alfa que interacciona. No obstante, la diferencia de energía entre las partículas alfa del  $^{239}\text{Pu}$  ( $E_\alpha = 5.15$  MeV) y del  $^{241}\text{Am}$  ( $E_\alpha = 5.45$  MeV) es tan pequeña que únicamente da lugar a ligeras diferencias en los espectros de neutrones de las fuentes de  $^{239}\text{Pu}/^9\text{Be}$  y  $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$ . En consecuencia, para estimar los factores de conversión de dosis de ambas fuentes, se utilizó sin modificarlo el espectro de energía de los neutrones de una fuente de  $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$  presentado en la Ref. [48].

CUADRO 27. PARÁMETROS NUCLEARES DE EMISORES RADIATIVOS DE NEUTRONES

| Fuente de neutrones                        | Origen de los neutrones | Parámetro nuclear                            |  |
|--|-------------------------|--|--|
|  |                         | Rendimiento de neutrones<br>(neutrón/(Bq×s)) | Rendimiento de energía de los fotones <sup>a</sup><br>(MeV/(Bq×s)) |
| $^{248}\text{Cm}$                          | SF <sup>b</sup>         | 2.6E-01 [38]                                 | 1.3E+00 [38, 65]   |
| $^{250}\text{Cf}$                          | SF                      | 2.7E-03 [38]                                 | 1.1E-02 [38, 65]   |
| $^{252}\text{Cf}$                          | SF                      | 1.1E-01 [38]                                 | 4.7E-01 [38, 65]   |
| $^{254}\text{Cf}$                          | SF                      | 3.9E+00 [38]                                 | 1.7E+01 [38, 65]   |
| $^{239}\text{Pu}/^9\text{Be}$ <sup>c</sup> | reacción ( $\alpha$ ,n) | 6.0E-05 [67]                                 | 9.4E-04 [38, 66]   |
| $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$ <sup>c</sup> | reacción ( $\alpha$ ,n) | 7.5E-05 [67]                                 | 3.2E-02 [38, 66]   |

<sup>a</sup> Este parámetro incluye los fotones originados por las desintegraciones alfa y beta, así como por la fisión espontánea y la reacción ( $\alpha$ ,n).

<sup>b</sup> Fisión espontánea (denotada por su sigla en inglés SF).

<sup>c</sup> La actividad indicada es la de un radionucleido emisor alfa, p. ej. el  $^{239}\text{Pu}$  o el  $^{241}\text{Am}$ .

### VIII.3. CADENAS DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

Todos los valores D se expresan en función de la actividad de la fuente en el momento de su fabricación. Esta actividad se denomina la actividad inicial del radionucleido predecesor contenido en la fuente o, más brevemente, la actividad inicial de la fuente. A fin de tener en cuenta las variaciones con el tiempo de las propiedades radiológicas de los radionucleidos de una fuente, los valores D se calcularon para la mezcla más peligrosa formada por el radionucleido predecesor y su progenie en una fuente hasta una edad límite de 10 años.

#### VIII.3.1. El enfoque experto

En el enfoque experto se aborda la desintegración y el aumento interno con un planteamiento sencillo y conservador en que se supuso que todos los descendientes estaban en equilibrio con la actividad inicial de su predecesor en el momento de la exposición de seres humanos debida a la emergencia. La

única excepción fue la cadena de desintegración del  $^{241}\text{Pu} - ^{241}\text{Am}$ . En el caso del  $^{241}\text{Pu}$ , simplemente se sumó el aumento interno del  $^{241}\text{Am}$  durante 10 años a la cantidad inicial de  $^{241}\text{Pu}$ . En consecuencia, al calcular los valores D, se estimó que al comenzar la exposición por cada becquerel de  $^{241}\text{Pu}$  había también 0.02 Bq de  $^{241}\text{Am}$ .

### VIII.3.2. El enfoque riesgo

En el enfoque riesgo se tiene en cuenta la desintegración y el aumento interno mediante el uso de un factor de conversión de dosis ajustado como se indica más adelante. El valor del factor de conversión de dosis ajustado se atribuyó a la actividad inicial y se determinó teniendo en cuenta la desintegración del radionucleido predecesor, el aumento interno de la progenie y sus propiedades nucleares. Se supuso que la exposición a la fuente tendría lugar cuando ésta contuviese la mezcla más peligrosa de radionucleidos producida por la desintegración del radionucleido predecesor. Por ejemplo, una fuente  $^{225}\text{Ra}$  tiene el factor de conversión de dosis ajustado más elevado para la irradiación de la región alveolar del tracto respiratorio (Tejido 3R) al cabo de 9 días y para la irradiación de la médula roja (Tejido 2) al cabo de 16 días. El plutonio-241 es más peligroso a los diez años, ya que se supone que en ese momento por cada becquerel de actividad inicial del  $^{241}\text{Pu}$  existen 0.62 Bq de  $^{241}\text{Pu}$  y 0.012 Bq de  $^{241}\text{Am}$ . El método utilizado en el enfoque riesgo para considerar las cadenas de desintegración se expone con mayor detalle seguidamente.

En una desintegración radiactiva un radionucleido predecesor produce una progenie. Si la progenie es radiactiva, dicha progenie y el radionucleido predecesor forman una cadena de desintegración radiactiva. Esta cadena puede expresarse de la siguiente manera:



donde:

"P" y "D" son los núcleos predecesor y descendiente (progenie);

$\lambda_P$  y  $\lambda_D$  son las constantes de desintegración de los radionucleidos predecesor y descendiente,  $s^{-1}$ .

La desintegración del radionucleido inicial (predecesor) comienza en  $t=0$ , cuando la fuente se fabrica y el número de núcleos descendientes es igual a cero,  $N_D(0)=0$ . A la edad  $t>0$  la fuente contiene una mezcla de núcleos de la cadena de desintegración. Las actividades de los radionucleidos predecesor y descendiente en la fuente son función del tiempo:

$$A_P(t) = A_P(0) \times \exp(-\lambda_P t), \quad (73)$$

$$A_D(t) = A_P(0) \frac{\lambda_D}{\lambda_D - \lambda_P} [\exp(-\lambda_P t) - \exp(-\lambda_D t)], \quad (74)$$

donde:

$A_P(t)$  es la actividad del radionucleido predecesor en el tiempo t, Bq;

$A_D(t)$  es la actividad del radionucleido descendiente en el tiempo t, Bq;

$A_P(0)$  es la actividad inicial del radionucleido predecesor para  $t=0$ , Bq;

$\lambda_P$  y  $\lambda_D$  son las constantes de desintegración de los radionucleidos predecesor y descendiente respectivamente,  $s^{-1}$ .

A una edad  $t > 0$  la fuente produce una exposición que da lugar a una dosis  $D(t)$  dependiente de la radiactividad de los radionucleidos de la cadena:

$$D(t) = [A_p(t) \times CF_p + A_D(t) \times CF_D] \times F, \quad (75)$$

donde:

$CF_p$  y  $CF_D$  son los factores de conversión de dosis de los radionucleidos predecesor y descendiente (factores de conversión de dosis para la dosis absorbida, la dosis ponderada según EBR, etc.);

$F$  es un producto de los factores de exposición con los que se tiene en cuenta el escenario en cuestión; y

$\lambda_p$  y  $\lambda_D$  son las constantes de desintegración de los radionucleidos predecesor y descendiente respectivamente,  $s^{-1}$ .

Si la dosis  $D(t)$  se normaliza con respecto a la actividad inicial de la fuente,  $A_p(0)$ , puede expresarse como:

$$D(t) = A_p(0) \times CF_{p+D}(t) \times F, \quad (76)$$

donde:

$A_p(0)$  es la actividad inicial del radionucleido predecesor para  $t=0$ , Bq;

$F$  es un producto de los factores de exposición con los que se tiene en cuenta el escenario en cuestión;

$CF_{p+D}(t)$  es el factor de conversión de dosis ajustado para una unidad de actividad inicial de un radionucleido predecesor a la edad  $t$  (cuando la fuente quedó descontrolada). Si se tienen en cuenta las ecuaciones (73), (74), (75) y (76), puede expresarse como:

$$CF_{p+D}(t) = CF_p \times \exp(-\lambda_p t) + CF_D \frac{\lambda_D}{\lambda_D - \lambda_p} [\exp(-\lambda_p t) - \exp(-\lambda_D t)]. \quad (77)$$

El valor de  $D(t)$  es máximo para  $t=t_{\max}$ , momento en que  $CF_{p+D}(t)$  también alcanza su máximo. El valor de  $t_{\max}$  depende de las propiedades de los radionucleidos de la cadena y está limitado por la edad máxima de 10 años fijada para la fuente:

$$t_{\max} = \begin{cases} 0, & \text{if } \tau \leq 0; \\ \tau, & \text{if } 0 < \tau < 10 \text{ years}; \\ 10 \text{ years}, & \text{if } 10 \text{ years} < \tau, \end{cases} \quad (78)$$

y

$$\tau = \begin{cases} 0, & \text{if } CF_D \lambda_D \leq CF_P \lambda_P; \\ \frac{1}{\lambda_P - \lambda_D} \ln \left[ \left( \frac{CF_P}{CF_D} + 1 \right) \frac{\lambda_P}{\lambda_D} - \frac{CF_P}{CF_D} \left( \frac{\lambda_P}{\lambda_D} \right)^2 \right], & \text{if } CF_D \lambda_D > CF_P \lambda_P. \end{cases} \quad (79)$$

El valor máximo del factor de conversión de dosis ajustado para la actividad inicial de un radionucleido predecesor en una fuente,  $CF_{P+}$ , viene dado por:

$$CF_{P+} = \max_{t>0} CF_{P+D}(t) = \begin{cases} CF_P, & \text{if } CF_D \lambda_D \leq CF_P \lambda_P; \\ CF_{P+D}(t_{\max}), & \text{if } CF_D \lambda_D > CF_P \lambda_P, \end{cases} \quad (80)$$

donde  $CF_{P+D}(t_{\max})$  viene dado por (77), para  $t=t_{\max}$  dado por (78).

Algunos de los radionucleidos del Cuadro 26 tienen más de una progenie. El algoritmo descrito más arriba para un segmento de una cadena radiactiva simple es también aplicable a la situación más general expresada por:

$$A_n(t) = A_P(0) \frac{\lambda_n}{\lambda_P} \sum_{i=0}^n q_{n,i} \exp(-\lambda_i t), \quad n=0, 1, \dots \quad (81)$$

donde:

$q_{n,i}$  son coeficientes relacionados por una fórmula reiterativa

$$q_{n,i} = -\frac{\lambda_{n-1}}{\lambda_i - \lambda_n} q_{n-1,i}, \quad i = 0, \dots, n-1, \text{ and } q_{0,0} = 1; \quad (82)$$

$$q_{n,n} = -\sum_{i=0}^{n-1} q_{n,i}; \quad (83)$$

$\lambda_i$  es la constante de desintegración de la progenie número  $i$  en la cadena donde el radionucleido predecesor tenga un índice 0.

El algoritmo ampliado se utilizó para calcular los factores de conversión de dosis del  $^{131m}\text{Te}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{225}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{227}\text{Ac}$ ,  $^{227}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{229}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Pa}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{232}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  y  $^{242m}\text{Am}$ .

#### VIII.4. CRITICIDAD

Al establecer los valores  $D$  la masa de la actividad inicial considerada peligrosa en varios escenarios de exposición se evaluó también respecto a un criterio que sirva para asegurarse de que la criticidad no es problema. Esto se hizo estableciendo un límite de criticidad de masa ( $A_c$ ). Muchos radionucleidos de número atómico ( $Z$ ) superior a 87 son capaces de mantener una reacción de fisión en cadena. En las Refs. [68, 69, 70] se presentan límites, expresados como masa subcrítica, conforme a los cuales los isótopos pueden ser utilizados de forma segura sin riesgo de criticidad. El Cuadro 28 los enumera junto con el límite de criticidad de la masa convertido en actividad,  $A_c$ . Además, el plutonio y el uranio muy enriquecido podrían ser utilizados por un equipo técnicamente competente para construir un dispositivo explosivo nuclear. Reconociendo esta posibilidad, el informe INFCIRC/225/Rev.4 "Protección física de los materiales y las instalaciones nucleares" [71], ofrece recomendaciones para la protección física de material nuclear contra detracciones no autorizadas y para la protección de material o instalaciones nucleares contra un sabotaje. Esta publicación del OIEA [71] ha establecido

directrices para tres categorías de materiales nucleares. Cada categoría lleva asociado un nivel recomendado de medidas de protección físicas basado en el riesgo potencial de que esos materiales sean utilizados en un explosivo nuclear. Según la Ref. [71], el "Material nuclear de la Categoría II" es el nivel más bajo para el que se justifican fuertes medidas de seguridad y una respuesta inmediata a fin de recuperar rápidamente el control del material perdido o robado. Los criterios aplicables al "Material nuclear de la Categoría II" se muestran también en el Cuadro 28.

Al establecer los valores  $A_C$  se dio prioridad a los criterios aprobados por la comunidad internacional en la Ref. [71]. Como puede verse en el Cuadro 28, los criterios de inclusión en el "Material nuclear de la Categoría II" eran inferiores a los límites de criticidad de masa presentados en las Refs. [68, 69] excepto para el  $^{241}\text{Pu}$ . El límite de criticidad del  $^{241}\text{Pu}$  en la Ref. [69] se refería a una solución acuosa, que solo sería aplicable para determinar el valor  $D_2$  (material dispersable). Cabría esperar que el límite de criticidad de la forma sólida, utilizado para definir una cantidad peligrosa de material no dispersado (valor  $D_1$ ), fuese un factor cinco o más veces superior al de la solución acuosa. Esto lo situaría por encima del criterio de inclusión en el "Material nuclear de la Categoría II". En consecuencia, en el caso del plutonio, el uranio muy enriquecido y el  $^{235}\text{U}$ , se aplicaron los criterios de inclusión en el "Material nuclear de la Categoría II" para establecer los valores D. Respecto de los radionucleidos no considerados en el informe INFCIRC/225/Rev.4 se utilizaron los valores mínimos de las Refs. [68, 69, 70] como criterios para el peligro de criticidad. A los efectos del peligro de criticidad, se supuso ilimitada (unlimited) cualquier cantidad de los radionucleidos de número atómico  $Z < 87$  enumerados en el Cuadro 26, excepto en el caso del  $^{222}\text{Rn}$ , cuyo valor  $A_C$  se presenta en el Cuadro 28.

CUADRO 28. VALORES DEL LIMITE DE CRITICIDAD DE MASA

| Radionucleido | Estimaciones del límite de criticidad de masa |           |                      | Criterios NMC-II [71] <sup>a</sup> | Criterios de criticidad usados en los valores D |           |
|---------------|---|-----------|----------------------|------------------------------------|---|-----------|
|               | Ref. [68]                                     | Ref. [69] | Ref. [70]            |                                    | $M_C$   | $A_C$     |
|               | (g)   | (g)       | (g)                  | (g)                                | (g)   | (TBq)     |
| Rn-222        |   |           | 1.5E+01              |                                    | 1.5E+01   | 8.5E+04   |
| Ra-223        |   |           | 1.5E+01              |                                    | 1.5E+01   | 2.9E+04   |
| Ra-224        |   |           | 1.5E+01              |                                    | 1.5E+01   | 8.8E+04   |
| Ra-225        |   |           | 1.5E+01              |                                    | 1.5E+01   | 2.2E+04   |
| Ra-226        |   |           | Unlimited            |                                    | Unlimited                                       | Unlimited |
| Ra-228        |   |           | 1.5E+01 <sup>b</sup> |                                    | 1.5E+01   | 1.5E+02   |
| Ac-227        |   |           | Unlimited            |                                    | Unlimited                                       | Unlimited |
| Ac-225        |   |           | 1.5E+01              |                                    | 1.5E+01   | 4.0E+01   |
| Ac-228        |   |           | 1.5E+01 <sup>b</sup> |                                    | 1.5E+01   | 1.2E+06   |
| Th-227        |   |           | 1.5E+01 <sup>b</sup> |                                    | 1.5E+01   | 1.7E+04   |
| Th-228        |   |           | Unlimited            |                                    | Unlimited                                       | Unlimited |
| Th-229        |   |           | Unlimited            |                                    | Unlimited                                       | Unlimited |
| Th-230        |   |           | Unlimited            |                                    | Unlimited                                       | Unlimited |
| Th-231        |   |           | 1.5E+01 <sup>b</sup> |                                    | 1.5E+01   | 3.0E+05   |
| Th-232        |   |           | Unlimited            |                                    | Unlimited                                       | Unlimited |
| Th-234        |   |           | 1.5E+01 <sup>b</sup> |                                    | 1.5E+01   | 1.3E+04   |
| Pa-230        |   |           | 1.5E+01 <sup>b</sup> |                                    | 1.5E+01   | 1.8E+04   |

| Radionucleido             | Estimaciones del límite de criticidad de masa |  |                      | Criterios NMC-II [71] <sup>a</sup> | Criterios de criticidad usados en los valores D |                      |
|---------------------------|---|--|----------------------|------------------------------------|---|----------------------|
|                           | Ref. [68]                                     | Ref. [69]                                    | Ref. [70]            |                                    | M <sub>C</sub>                                  | A <sub>C</sub>       |
|                           | (g)   | (g)  | (g)                  | (g)                                | (g)   | (TBq)                |
| Pa-231                    |   |  | 1.0E+04              |                                    | 1.0E+04   | 1.8E+01              |
| Pa-233                    |   |  | 1.5E+01 <sup>b</sup> |                                    | 1.5E+01   | 1.2E+04              |
| U-230                     |   |  | 1.5E+01 <sup>b</sup> |                                    | 1.5E+01   | 1.5E+04              |
| U-232                     |   |  | 5.0E+02              |                                    | 5.0E+02   | 4.0E+02              |
| U-233                     | 5.5E+02 <sup>c</sup>                          |  | 1.95E+02             |                                    | 2.0E+02   | 7.0E-02              |
| U-234                     | 6.7E+02 <sup>d</sup>                          |  | 5.0E+02              |                                    | 5.0E+02   | 1.2E-01              |
| U-235                     | 7.6E+02 <sup>c</sup>                          |  | 2.9E+02              | 1.E+03                             | 1.E+03  | 8.0E-05              |
| <sup>235</sup> U > 20%    | 2.0E+04 <sup>d</sup>                          |  |                      | 1.E+03                             | 1.E+03  | 8.0E-05 <sup>e</sup> |
| <sup>235</sup> U 10% -20% |   |  |                      | 1.E+04                             | 1.E+04  | 8.0E-04 <sup>e</sup> |
| U-236                     |   |  | Unlimited            |                                    | Unlimited                                       | Unlimited            |
| U-238                     |   |  | Unlimited            |                                    | Unlimited                                       | Unlimited            |
| Np-235                    |   |  | 5.0E+02              |                                    | 5.0E+02   | 2.6E+04              |
| Np-236b                   |   |  | 1.5E+01 <sup>b</sup> |                                    | 1.5E+01   | 7.3E-03              |
| Np-236a                   |   |  | 1.5E+01 <sup>b</sup> |                                    | 1.5E+01   | 3.3E+05              |
| Np-237                    |   | 2.0E+04 <sup>f</sup>                         | 1.0E+04              |                                    | 1.0E+04   | 2.6E-01              |
| Np-239                    |   | 3.0E+04 <sup>g</sup>                         | Unlimited            |                                    | Unlimited                                       | Unlimited            |
| Pu-236                    |   |  | 5.0E+02              | 5.E+02                             | 5.0E+02   | 9.9E+03              |
| Pu-237                    |   |  | 1.5E+01 <sup>b</sup> | 5.E+02                             | 1.5E+01   | 6.8E+03              |
| Pu-238                    |   | 3.0E+03 <sup>f</sup>                         | 1.0E+03              | 5.E+02                             | 5.E+02  | 3.0E+02              |
| Pu-239                    | 5.1E+02 <sup>c</sup>                          | 4.0E+03 <sup>g</sup><br>4.5E+02 <sup>h</sup> | 1.45E+02             | 5.E+02                             | 5.E+02  | 1.0E+00              |
| Pu-240                    | 5.0E+03 <sup>d</sup>                          | 1.5E+04 <sup>f</sup>                         | 1.0E+04              | 5.E+02                             | 5.E+02  | 4.0E+00              |
| Pu-241                    |   | 2.0E+04 <sup>g</sup><br>2.0E+02 <sup>h</sup> | 6.0E+01              | 5.E+02                             | 5.E+02  | 2.0E+03              |
| Pu-242                    |   | 4.0E+04 <sup>f</sup>                         | 1.8E+04              | 5.E+02                             | 5.E+02  | 7.0E-02              |
| Pu-244                    |   | 6.0E+04 <sup>g</sup>                         | 5.0E+02              | 5.E+02                             | 5.0E+02   | 3.3E-04              |
| Am-241                    |   | 1.6E+04 <sup>f</sup>                         | 1.0E+04              |                                    | 1.0E+04   | 1.3E+03              |
|                           |   | 2.4E+04 <sup>g</sup>                         |                      |                                    |   |                      |

| Radionucleido | Estimaciones del límite de criticidad de masa |  |                      | Criterios NMC-II [71] <sup>a</sup> | Criterios de criticidad usados en los valores D |                |
|---------------|---|--|----------------------|------------------------------------|---|----------------|
|               | Ref. [68]                                     | Ref. [69]                                    | Ref. [70]            |                                    | M <sub>C</sub>                                  | A <sub>C</sub> |
|               | (g)   | (g)  | (g)                  |                                    | (g)   | (TBq)          |
| Am-242m       |   | 1.3E+01 <sup>h</sup>                         | 4.0E+00              |                                    | 4.0E+00   | 1.4E+00        |
| Am-243        |   | 2.5E+04 <sup>f</sup>                         | 1.0E+04              |                                    | 1.0E+04   | 7.4E+01        |
| Am-244        |   | 3.5E+04 <sup>g</sup>                         | 2.0E+00 <sup>i</sup> |                                    | 2.0E+00   | 9.4E+04        |
| Cm-240        |   |  | 2.0E+00 <sup>i</sup> |                                    | 2.0E+00   | 1.5E+03        |
| Cm-241        |   |  | 2.0E+00 <sup>i</sup> |                                    | 2.0E+00   | 1.2E+03        |
| Cm-242        |   |  | 5.0E+02              |                                    | 5.0E+02   | 6.1E+04        |
| Cm-243        |   | 9.0E+01 <sup>h</sup>                         | 3.5E+01              |                                    | 3.5E+01   | 6.7E+01        |
| Cm-244        |   | 3.0E+03 <sup>f</sup>                         | 1.0E+03              |                                    | 1.0E+03   | 3.0E+03        |
| Cm-245        |   | 5.0E+03 <sup>g</sup><br>3.0E+01 <sup>h</sup> | 1.4E+01              |                                    | 1.4E+01   | 8.9E-02        |
| Cm-246        |   |  | 5.0E+02              |                                    | 5.0E+02   | 5.7E+00        |
| Cm-247        |   | 9.0E+02 <sup>h</sup>                         | 3.0E+02              |                                    | 3.0E+02   | 1.0E-03        |
| Cm-248        |   |  | 5.0E+02              |                                    | 5.0E+02   | 7.9E-02        |
| Bk-247        |   |  | 2.0E+00 <sup>i</sup> |                                    | 2.0E+00   | 7.8E-02        |
| Bk-249        |   |  | 5.0E+02              |                                    | 5.0E+02   | 3.0E+04        |
| Cf-248        |   |  | 2.0E+00 <sup>i</sup> |                                    | 2.0E+00   | 1.2E+02        |
| Cf-249        |   | 1.0E+01 <sup>h</sup>                         | 4.0E+00              |                                    | 4.0E+00   | 6.1E-01        |
| Cf-251        |   | 5.0E+00 <sup>h</sup>                         | 2.0E+00              |                                    | 2.0E+00   | 8.1E+00        |
| Cf-250        |   |  | 5.0E+02              |                                    | 5.0E+02   | 2.9E+01        |
| Cf-252        |   |  | 5.0E+02              |                                    | 5.0E+02   | 1.0E+04        |
| Cf-253        |   |  | 2.0E+00 <sup>i</sup> |                                    | 2.0E+00   | 2.1E+03        |
| Cf-254        |   |  | 2.0E+00 <sup>i</sup> |                                    | 2.0E+00   | 6.3E+02        |

<sup>a</sup> Material nuclear de la Categoría II

<sup>b</sup> Valor por defecto para los isótopos de número atómico  $88 \leq Z < 95$ .

<sup>c</sup> Datos para soluciones acuosas presentados en el Cuadro 1 de la Ref. [68].

<sup>d</sup> Datos para metales presentados en el Cuadro 2 de la Ref. [68].

<sup>e</sup> A<sub>C</sub> expresada en forma de actividad del <sup>235</sup>U. La actividad total por unidad de masa de uranio enriquecido incluye al <sup>234</sup>U, que se concentra durante el proceso de enriquecimiento, y también la actividad del <sup>238</sup>U, como se indica en la Ref. [35].

<sup>f</sup> Datos para formas metálicas presentados en el Cuadro 1 de la Ref. [69].

<sup>g</sup> Datos para soluciones acuosas de nucleidos actínidos no fisibles presentados en el Cuadro 1 de la Ref. [69].

<sup>h</sup> Datos para soluciones acuosas de nucleidos actínidos fisibles presentados en el Cuadro 2 de la Ref. [69].

<sup>i</sup> Valor por defecto para los isótopos de número atómico  $95 \leq Z < 99$ .

## VIII.5. TOXICIDAD QUÍMICA

La toxicidad química de las fuentes dispersadas se analizó comparando las concentraciones que implican peligro inmediato para la vida o la salud (PIVS) [72] con la concentración atmosférica resultante de la liberación de material de masa equivalente al valor  $D_2$  en de una habitación, como indica la expresión:

$$C = \frac{D_2 \times RRF}{SA \times V}, \quad (84)$$

donde:

C es una concentración atmosférica del material dispersado,  $g/m^3$ ;

$D_2$  es el valor  $D_2$ , Bq, y se presenta en el Cuadro 1;

SA es la actividad específica del radionucleido, (Bq/g), y se presenta en el Cuadro 26;

V es el volumen de la habitación donde se libera el material,  $1\ 000\ m^3$ ;

RRF es la fracción de liberación respirable de la actividad inicial contenida en una fuente y es igual a 0.1 como se indica en el Escenario III (Apéndice II).

El nivel PIVS (o nivel PIVS presentado por el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacionales (NIOSH) de Estados Unidos) se considera el límite más allá del cual un individuo no será capaz de evitar la muerte o lesiones permanentes si no recibe ayuda en menos de treinta minutos. En los casos en que no se pudo hallar un nivel PIVS en la Ref. [72] se supuso que era de  $10\ mg/m^3$ , valor representativo del confín inferior de esos niveles. Se comprobó que, para prácticamente todos los radionucleidos, las concentraciones atmosféricas C derivadas de los valores  $D_2$ , tal como se expresan en la ecuación (84), eran inferiores al nivel PIVS en un factor 10, y, en la mayoría de los casos, inferiores en un factor 1 000 o superior. En el caso de los radionucleidos de uranio (y posiblemente de torio) que tienen valores  $D_2$  ilimitados, la toxicidad química de la dispersión podría constituir un motivo de preocupación. En cuanto a los radionucleidos cuya concentración atmosférica calculada mediante la ecuación (84) se aproximaba o excedía el nivel PIVS, o  $10\ mg/m^3$  (cuando fuese la apropiada), se insertaron notas precautorias en la lista de valores D en el Cuadro 1.



## REFERENCIAS

- [1] ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, OFICINA DE COORDINACIÓN DE ASUNTOS HUMANITARIOS DE LAS NACIONES UNIDAS, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, Preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica, Requisitos de Seguridad, Colección de Normas de Seguridad N° GS-R-2, OIEA, Viena (2004).
- [2] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Método para elaborar disposiciones de respuesta a emergencias nucleares o radiológicas, EPR-METHOD, OIEA, Viena (2009).
- [3] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency, Colección de Normas de Seguridad N° GS-G-2.1, OIEA, Viena (2006).
- [4] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Clasificación de las fuentes radiactivas, Colección de Normas de Seguridad N° RS-G-1.9, OIEA, Viena (2009).
- [5] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Código de conducta sobre la seguridad tecnológica y física de las fuentes radiactivas, IAEA/CODEOC/2004, OIEA, Viena (2004).
- [6] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos, edición de 2009, Colección de Normas de Seguridad N° TS-R-1, OIEA, Viena (2009).
- [7] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4 Inhalation Dose Coefficients, Annals of the ICRP, v. 25 n° 3-4. ICRP publication 71, Pergamon Press, Oxford: ICRP (1995).
- [8] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, The Radiological Accident at the Irradiation Facility in Nesvizh, OIEA, Viena (1996).
- [9] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Report on the preliminary fact finding mission following the accident at the nuclear fuel processing facility in Tokaimura, Japón, OIEA, Viena (1999).
- [10] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Criterios de intervención en caso de emergencia nuclear o radiológica, Colección Seguridad N° 109, OIEA, Viena (1996).
- [11] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación, Colección Seguridad, N° 115, OIEA, Viena (1997).

- [12] COMISIÓN REGULADORA NUCLEAR DE LOS EE.UU., Abrahamson, S., Bender, M., Book, S., Buncher, C., Denniston, C., Gilbert, E., Hahn, F., Hertzberg, V., Maxon, H., Scott, B., Schull, W., y Thomas, S. Health Effects Models for Nuclear Power Plant Accident Consequence Analysis, Low LET Radiation, NUREG/CR-4214, Rev.1, Part II SAND85-7185 (1989).
- [13] COMISIÓN REGULADORA NUCLEAR DE LOS EE.UU., Evans, J.S., Abrahamson, S., Bender, M.A., Boecker, B.B., Gilbert, E.S. y Scott, B.R. Health Effects Models for Nuclear Power Accident Consequence Analysis. Part I: Introduction, Integration, and Summary. NUREG/CR-4214 Rev. 2, Part I ITRI-141 (1993).
- [14] COMISIÓN REGULADORA NUCLEAR DE LOS EE.UU., Abrahamson, S., Bender, M.A., Boecker, B.B., Gilbert, E.S. y Scott, B.R. Health Effects Models for Nuclear Power Accident Consequence Analysis. Modification of Models Resulting From Addition of Effects of Exposure to Alpha-Emitting Radionuclides. Part II: Scientific Bases for Health Effects Models. NUREG/CR-4214 Rev. 1, Part II Addendum 2 LFM-136 (1993).
- [15] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, Development of an extended framework for emergency response criteria: Interim report for comments, IAEA-TECDOC-1432, OIEA, Viena (2005).
- [16] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66, Ann. ICRP Vol. 24 No. 1-3, Pergamon Press, Oxford (Reino Unido) (1994).
- [17] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, The Biological Basis for Dose Limitation in the Skin, ICRP Publication 59, Ann ICRP Vol. 22, N° 2, Pergamon Press, Oxford (Reino Unido) (1991).
- [18] COMISIÓN INTERNACIONAL DE UNIDADES Y MEDIDAS RADIOLÓGICAS, Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection, ICRU Report 56, ICRU, Bethesda (1996).
- [19] Hopewell, J.W. Biological Effects of Irradiation on Skin and Recommendation Dose Limits, Radiation Protection Dosimetry, Vol 39, N° 1/3 pp 11-24 (1991).
- [20] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, Recomendaciones de 1990 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, Publicación ICPR-60, Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR) - EDICOMPLET, S.A. - Madrid (1995).
- [21] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, Generic procedures for medical response during nuclear or radiological emergency, EPR-MEDICAL, Viena (2005).
- [22] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q) and Radiation Weighting Factor ( $w_R$ ), ICRP Publication 92. Ann ICRP Vol.33 N° 4, Pergamon Press, Oxford (Reino Unido) (2003).
- [23] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, MEMORANDUM, The evolution of the system of radiological protection: the justification for new ICRP recommendations. J. Radiol. Prot. 23 (2003) 129-142.
- [24] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, RBE for Deterministic Effects, ICRP Publication 58, Pergamon Press, Oxford y Nueva York (1989).

- [25] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Diagnosis and Treatment of Radiation Injuries, Colección de Informes de Seguridad N° 2, OIEA, Viena (1998).
- [26] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Follow-up of delayed health consequences of acute accidental radiation exposure, Lessons to be learned from their medical management, IAEA-TECDOC-1300, OIEA, Viena (2002).
- [27] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, The Radiological Accident in Lilo, OIEA, Viena (2000).
- [28] AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS EE.UU., Federal Guidance Report 11 Limiting-values of radionuclide intake and air concentration and dose conversion factors for inhalation, submersion, and ingestion, Eckerman, K. F., Wolbarst, A.B. y Richardson, A.C.B. EPA-520/1-88-020. Laboratorio Nacional de Oak Ridge, Oak Ridge, TN, Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU, Washington, DC (1988).
- [29] Scott B. R. Proposed estimates of the probability of inducing pulmonary injury sufficient to cause death from radiation pneumonitis and pulmonary fibrosis after briefly inhaling a mixture of insoluble  $\beta$ -emitting particles, Health Phys 38: 635-642 (1980).
- [30] Scott B. R., y Hahn F. F. A model that leads to the Weibull distribution function to characterize early radiation response probabilities, Health Phys 39:521-530 (1980).
- [31] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, The Radiological Accident in Yanango, OIEA, Viena (2000).
- [32] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, The Radiological Accident in Gilan, OIEA, Viena (2002).
- [33] COMISIÓN REGULADORA NUCLEAR DE LOS EE.UU., A Regulatory Analysis on Emergency Preparedness for Fuel Cycle and Other Radioactive Material Licensees, US Nuclear Power Plants, NUREG-1140, USNRC, Washington, DC (1988).
- [34] DEPARTAMENTO DE ENERGÍA DE LOS EE.UU., DOE Handbook, Airborne Release Fractions/Rates and Respirable Fractions for Non-reactor Nuclear Facilities, DOE-HDBK-3010-94 (1994).
- [35] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Manual Explicativo para la aplicación del Reglamento del OIEA para el transporte seguro de materiales radiactivos, Colección de Normas de Seguridad N° TS-G-1.1 (ST-2), OIEA, Viena (2008).
- [36] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, El accidente radiológico de Goiânia, OIEA, Viena (1989).
- [37] Gus'kova, A.K., Nadezhina, N.M., Barabanova, A.V., et al. Acute effects of radiation exposure following the Chernobyl accident: immediate results of radiation sickness and outcome of treatment. In Medical aspects of the Chernobyl accident (Proceedings of the conference in Kiev 11-13 May, 1988) IAEA-TECDOC-516: 233-256, Viena, OIEA (1989).
- [38] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, Radionuclide Transformations, Energy and Intensity of Emission, ICRP Publication 38, Ann ICRP Vol. 11-13, Pergamon Press, Oxford (Reino Unido) (1984).

- [39] Dillman, L.T., y Eckerman, K.F. Electron External and Internal Bremsstrahlung Spectra, ORNL/TM-12451 (1994) (no publicado).
- [40] AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS EE.UU., Federal Guidance Report 12 External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil, Keith F. Eckerman and Jeffrey C. EPA-402-R-93-081, Laboratorio Nacional de Oak Ridge, Oak Ridge, TN, Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU., Washington, DC (1993).
- [41] COMISIÓN INTERNACIONAL DE UNIDADES Y MEDIDAS RADIOLÓGICAS, Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement, ICRU Report 44, Bethesda, MD (1989).
- [42] SECRETARÍA DE COMERCIO DE LOS EE.UU., Hubbell, J. H. y Seltzer, S. M. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients, División de Radiaciones Ionizantes, Laboratorio de Física, Instituto Nacional de Normas y Tecnología, Gaithersburg, MD, NISTIR 5632, Secretaría de Comercio de los EE.UU. en nombre de los Estados Unidos de América, (1996).
- [43] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26 3/4, Pergamon Press, Oxford (Reino Unido) (1996).
- [44] Shults, J.K., Faw, R.E., Radiation shielding. Prentice Hall PTR, NJ, EE.UU. (1996).
- [45] Eckerman, K.F. RADIation SUMmary Code - RadSum 32 Code: A Win 32 version. En conjunto con ICRP38 v. 1.0 (3/25/2003). Descarga gratis ofrecida por el Centro de Investigaciones sobre Biocinética y Dosimetría, Laboratorio Nacional de Oak Ridge, Oak Ridge, TN 37831. Disponible en: <http://ordose.ornl.gov/downloads.html>. Acceso efectuado el 1º de marzo de 2006.
- [46] Eckerman, K.F., Rawl, R., Hughes, J.S. y Bolgona, L., Type A package limits of spontaneous fission radionuclides, PATRAM-2001, Actas del 13<sup>er</sup> Simposio Internacional sobre embalaje y transporte de materiales radiactivos (Chicago, IL, EE:UU., 3 a 7 de septiembre de 2001), Departamento de Energía de los EE.UU. (2002).
- [47] Shleien, B. The Health Physics and Radiation Protection Health Handbook, Scinta Inc., Silver Spring MD, EE.UU. (1992).
- [48] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes, Supplement to Technical Reports Series N<sup>o</sup> 318. Colección de Informes Técnicos N<sup>o</sup> 403. OIEA, Viena (2001).
- [49] AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS EE.UU., Federal Guidance Report 13 Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides: CD Supplement, EPA 402-C-99-001 Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU., Washington, DC (1999).
- [50] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, The ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public, version 1.0, Ampliación de las Publicaciones ICRP 68 y 72, elaborada por el Grupo de Tareas sobre Cálculo de Dosis del Comité 2 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, CD-ROM, Pergamon Press, Oxford (Reino Unido) (1998).
- [51] DEPARTAMENTO DE ENERGÍA DE LOS EE.UU., Eckerman, K. F., Sjoeren A. L. Radiological Toolbox User's Manual, ORNL/TM-2004/27, Laboratorio Nacional de Oak Ridge,

Oak Ridge, TN (2004). La "Radiological Toolbox" puede descargarse del sitio web oficial del ORNL <http://ordose.ornl.gov/downloads.html>

- [52] Aleksankin V.G., Rodichev S.V., Rubtsov P.M., Hezhansky G.A., y Chukreev F.E. Beta- and antineutrino radiation of radioactive nuclei. *Energoatomizdat: Moscú* (1989).
- [53] Rohlogg F., Heinzelmann M. Dose rate by photons radiation to the basal layer of the dermis in case of skin contamination. *Rad. Prot. Dosim.* 63: 15-28 (1996).
- [54] Faw, R.E. Absorbed doses to skin from radionuclide sources on the body surface. *Health Phys.*, 63: 442-448 (1992).
- [55] Delacroix D., Guerre J. P., Leblanc P., y Hickman C. Radionuclide and radiation protection data handbook. 2nd Edition (2002). *Rad. Prot. Dosim.* 98: 1-168 (2002).
- [56] Kocher D.C., and Eckerman K.F., Electron dose-rate conversion factors for external exposure of the skin from uniformly deposited activity on the body surface. *Health Phys.* 53: 135-141 (1987).
- [57] Cross W.G., Freedman N.O., y Wong P.Y. Beta ray dose distributions from skin contamination. *Rad. Prot. Dosim.* 40: 149-168 (1992).
- [58] COMISIÓN REGULADORA NUCLEAR DE LOS EE.UU., J. S. VARSKIN MOD2 and SADDE MOD2: Computer Codes for Assessing Skin Dose from Skin Contamination NUREG/CR-5873. Comisión Reguladora Nuclear de los EE.UU., Washington (1992).
- [59] COMISIÓN REGULADORA NUCLEAR DE LOS EE.UU., Loss of an Iridium-192 Source and Therapy Misadministration at Indiana Regional Cancer Center, Indiana, Pennsylvania, on November 16, 1992, NUREG-1480, Comisión Reguladora Nuclear de los EE.UU., Washington, DC (1992).
- [60] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Lessons Learned from Accidents in Industrial Radiography, Colección de Informes de Seguridad, N° 7, OIEA, Viena (1998).
- [61] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, The Radiological Accident in Istanbul, OIEA, Viena (2000).
- [62] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, The Radiological Accident in Samut Prakarn, OIEA, Viena (2002).
- [63] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, The Radiological Accident in Tammiku, OIEA, Viena (1998).
- [64] Hübner, K.F; Fry, S.A, The Medical Basis for Radiation Accident Preparedness Elsevier/North Holland, NY, (1980).
- [65] Dillman, L., T., Jones, T., D. Internal dosimetry of spontaneously fissioning radionuclides. *Health Physics* 29: 111-123 (1975).
- [66] Croft, S. The use of neutron intensity calibrated  $^9\text{Be}(\alpha,n)$  sources as 4438 keV gamma-ray reference standards. *Nucl. Instr. Meth.* A281: 103-116 (1989).

- [67] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Tables of recommended standard data: neutron yields from alpha particle induced reactions on lithium, beryllium, boron, carbon, oxygen and fluorine nuclei for energies up to 10 MeV. Vukolov, V.A. y Chukreev, F.E., Informe del Comité Internacional de Datos Nucleares INDC(CCP)-331, OIEA, Viena (1991).
- [68] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN DE LOS ESTADOS UNIDOS, Nuclear criticality safety in operations with fissionable materials outside reactors, ANSI N16.1-1975, Hinsdale, EE.UU. (1975).
- [69] SOCIEDAD NUCLEAR AMERICANA, Nuclear criticality control of special actinide elements, an American national standard, ANSI/ANS-8.15-1981, La Grange, EE.UU. (1981).
- [70] Criticality Safety. Document 20.6. Environment, Safety and Health manual Vol. II: Health & Safety – Controls and Hazards. Part 20: Ionizing Radiation/Nonionizing Radiation. Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, Universidad de California, UCRL-AM-133867. (2005).
- [71] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Protección física de los materiales y las instalaciones nucleares, INFCIRC/225/Rev.4, OIEA, Viena (1999).
- [72] CENTROS PARA EL CONTROL Y LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES DE LOS ESTADOS UNIDOS (CDC), Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacionales (NIOSH), octubre de 2002, sitio web: [www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html](http://www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html).
- [73] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference-values, ICRP Publication 89. Annals of the ICRP 32 N° 3-4. Pergamon Press, Oxford (Reino Unido) (2002).

## DEFINICIONES

**DDR.** Dispositivos de dispersión radiológica.

**dosis.** 1) Medida de la energía depositada por la radiación en un blanco. 2) Término general usado para designar magnitudes tales como: dosis absorbida, dosis ponderada según EBR, dosis de radiación ponderada y dosis efectiva.

**dosis absorbida comprometida,  $D_T(\Delta)$ .** La magnitud  $D_T(\Delta)$  es característica de la exposición interna y se define como:

$$D_T^R(\Delta) = \int_{t_0}^{t_0+\Delta} \dot{D}_T^R(t) dt;$$

donde  $t_0$  es el tiempo de incorporación,  $\dot{D}_T^R(t)$  es la tasa de dosis al órgano en un tiempo  $t$  en el órgano o tejido  $T$ , y  $\Delta$  es el tiempo transcurrido desde la incorporación del material radiactivo.

- a) En una incorporación de material radiactivo, una dosis absorbida comprometida causa una irradiación interna de los órganos y tejidos de un individuo ajustada a su distribución en el cuerpo del hombre de referencia, la cual tendría lugar después de la misma incorporación.

**dosis absorbida,  $D$ .** Magnitud dosimétrica fundamental  $D$ , definida como:

$$D = \frac{\bar{d\varepsilon}}{dm}$$

donde  $\bar{d\varepsilon}$  es la energía media impartida por la radiación ionizante a la materia en un elemento de volumen, y  $dm$  es la masa de la materia existente en el elemento de volumen. La unidad de dosis absorbida es J/kg, denominada gray (Gy).

**dosis en un órgano,  $D_T^R$ .** Dosis absorbida media en un órgano o tejido  $T$  específico del cuerpo humano. Viene dada por:

$$D_T^R = \frac{\Delta\varepsilon_R}{m_T};$$

donde  $m_T$  es la masa del órgano o tejido  $T$ , y  $\Delta\varepsilon_R$  es la energía de la radiación ionizante  $R$ , impartida a la masa del órgano o tejido en cuestión. La calidad de la radiación no se tiene en cuenta al evaluar la dosis absorbida en un órgano.

**dosis ponderada según EBR,  $AD_T$ .** Producto de la dosis absorbida en un órgano o tejido y la eficacia biológica relativa de la radiación que imparte la dosis:

$$AD_T = \sum_R D_T^R \times RBE_T^R;$$

donde  $D_T^R$  es la dosis en un órgano debida a la radiación  $R$  en el tejido  $T$ , y  $RBE_T^R$  es la eficacia biológica relativa de la radiación  $R$  al producir un efecto específico en un determinado

órgano o tejido T. La unidad de dosis absorbida ponderada según EBR es  $J \times kg^{-1}$ , denominada gray-equivalente (Gy-Eq).

- a) El fin de la dosis absorbida ponderada según EBR es tener en cuenta las diferencias de eficacia biológica al producir efectos deterministas en la salud en órganos o tejidos del hombre de referencia debidas a la calidad de la radiación.

**dosis ponderada según EBR comprometida,  $AD_T(\Delta)$ .** La magnitud  $AD_T(\Delta)$  es característica de la exposición interna y se define como:

$$AD_T(\Delta) = \int_{t_0}^{t_0+\Delta} \dot{AD}_T(t) dt ;$$

donde  $t_0$  es el tiempo de incorporación,  $\dot{AD}_T(t)$  es la tasa de dosis ponderada según EBR en el tiempo  $t$  en un órgano o tejido T, y  $\Delta$  es el tiempo transcurrido después de la incorporación del material radiactivo.

- a) En una incorporación de material radiactivo, una dosis ponderada según EBR comprometida causa una irradiación interna de los órganos y tejidos de un individuo ajustada a la calidad de la radiación y su distribución en el cuerpo del hombre de referencia, la cual tendría lugar después de la misma incorporación.

**efecto determinista.** Efecto de la radiación en la salud para el que existe, por lo general, un nivel umbral de dosis por encima del cual la gravedad del efecto aumenta al elevarse la dosis. Tal efecto se describe como efecto determinista grave cuando causa o puede causar la muerte o cuando produce una lesión permanente que merma la calidad de vida.

**efecto determinista grave.** Efecto de la radiación en la salud que causa o puede causar la muerte o produce una lesión permanente que merma la calidad de vida.

**efecto estocástico (de la radiación).** Efecto radioinducido en la salud, cuya probabilidad aumenta al elevarse la dosis de radiación y cuya gravedad (cuando se produce) es independiente de la dosis. Los efectos estocásticos pueden ser efectos somáticos o hereditarios y, por lo general, se producen sin un nivel de dosis umbral. Como ejemplos pueden citarse el cáncer de tiroides y la leucemia.

**eficacia biológica relativa,  $RBE_T^R$ .** Para un determinado órgano o tejido T, la  $RBE_T^R$  es la relación entre la dosis absorbida a causa de una radiación de referencia que produce un efecto biológico específico y la dosis absorbida a causa de la radiación de interés (R) que produce el mismo efecto biológico. En general, el valor de  $RBE_T^R$  para los efectos biológicos de una radiación depende de factores tales como la calidad de la radiación, el órgano o tejido irradiado, el efecto comprometido y la tasa de dosis. Los valores de  $RBE_T^R$  para efectos deterministas graves en la salud utilizados en este manual figuran en los Cuadros 8 y 9.

**emergencia nuclear o radiológica.** Emergencia en la que existe, o se considera que existe, un peligro debido a:

- a) la energía derivada de una reacción nuclear en cadena o de la desintegración de los productos de una reacción en cadena; o
- b) la exposición a la radiación.

**exposición.** Acto o situación de estar sometido a irradiación. Puede ser externa (debida a una fuente situada fuera del cuerpo) o interna (debida a una fuente situada dentro del cuerpo).

**exposición aguda.** Exposición recibida en un corto período de tiempo.

- a) Se emplea normalmente para referirse a exposiciones lo suficientemente cortas para que las dosis resultantes puedan ser consideradas como instantáneas (por ejemplo, menos de una hora).

**exposición interna.** Exposición causada por una fuente situada dentro del cuerpo (debido a la deposición de radionucleidos en un tejido corporal).

**fuelle peligrosa.** Fuente que, si no estuviera bajo control, podría dar lugar a una exposición suficiente para causar efectos deterministas graves. Esta designación se emplea para determinar la necesidad de medidas de respuesta a emergencias y no debe confundirse con la clasificación de las fuentes con otros fines.

**gray-equivalente, Gy-Eq.** Nombre de la unidad de dosis absorbida ponderada según EBR.

**hombre de referencia** Ser humano adulto de las características anatómicas y fisiológicas definidas en el informe del Task Group on Reference Man de la CIPR [73].

**incorporación.** 1) Ingestión o inhalación de un material radiactivo. 2) Cantidad de material radiactivo (actividad, Bq) incorporado al organismo humano por inhalación, ingestión, absorción a través de la piel, inyección o a través de una herida.

**incorporación aguda.** Incorporación que ocurre en un intervalo de tiempo suficientemente corto para que pueda tratarse como instantánea a los efectos de evaluar la dosis comprometida resultante.

**trabajador de referencia.** Trabajador adulto de las características anatómicas y fisiológicas definidas en el informe del Task Group on Reference Man de la CIPR [73].

**valor D.** Cantidad de material radiactivo que, si no está controlado, podría causar la muerte de un individuo expuesto o una lesión permanente que mermase la calidad de vida de dicha persona. Los escenarios de exposición utilizados para determinar los valores D pertenecen a dos grupos: uno relativo al material no dispersado y otro relativo al material dispersado. Se presentan valores D distintos para cada uno de estos grupos:

- a) El valor  $D_1$  es la actividad<sup>24</sup> de un radionucleido presente en una fuente que, de estar incontrolada pero no dispersada (es decir, permanece encapsulada), posiblemente provocaría una emergencia que pudiera preverse razonablemente causase efectos deterministas graves en la salud;
- b) El valor  $D_2$  es la actividad<sup>24</sup> de un radionucleido presente en una fuente que, de estar incontrolada y dispersada, posiblemente provocaría una emergencia que pudiera preverse razonablemente causase efectos deterministas graves en la salud;
- c) El valor D es el menor de los valores  $D_1$  y  $D_2$  para un radionucleido.

**vía de exposición.** Ruta por la que la radiación o los radionucleidos pueden alcanzar a los seres humanos y causar exposición. Una vía de exposición puede ser muy simple, por ejemplo, la

---

<sup>24</sup> Se tiene en cuenta el hecho de que las fuentes pueden ser más peligrosas en una etapa posterior de su vida (hasta 10 años) debido al aumento interno de la progenie; no obstante, los valores D se expresan en términos de la actividad de los radionucleidos predecesores antes de la desintegración, es decir, en el momento de la fabricación, como se indica en el Apéndice VIII.

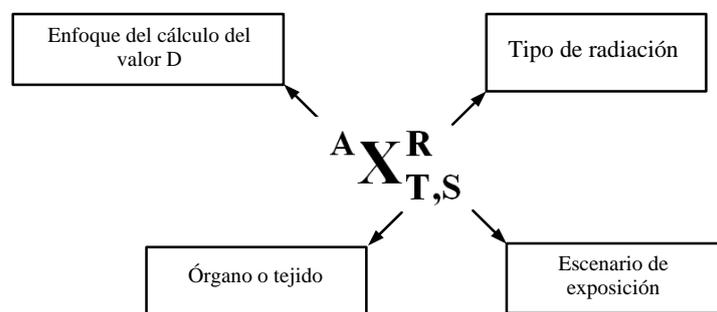
exposición externa a radionucleidos presentes en el aire, o más compleja, por ejemplo, la exposición interna por ingestión de leche de vacas que hayan comido pastos contaminados por radionucleidos depositados sobre el terreno.

## **ANEXOS**



## ANEXO I. FORMATO DE SÍMBOLOS E ÍNDICES

Por lo general, los símbolos de las magnitudes dosimétricas utilizadas en los enfoques experto y riesgo pueden tener hasta cuatro índices, como muestra la Fig. 11.



*FIG. 11. Indexación de las magnitudes dosimétricas.*

Los índices son:

“A” indica el enfoque utilizado:

- a) “E” - enfoque experto; y
- b) “R” - enfoque riesgo.

“R” indica el tipo de radiación:

- a) “L” - radiación de baja TLE;
- b) “H” - radiación de alta TLE;
- c) “L+H” - cualquier radiación; y
- d) “S” puede usarse para indicar un compuesto con absorción pulmonar de tipo s.

“S” indica el escenario de exposición:

- a) “I” - escenario “bolsillo”;
- b) “II” - escenario “habitación”;
- c) “III” - escenario “inhalación”;
- d) “IV” - escenario “ingestión”;
- e) “V” - escenario “contaminación de la piel”; y
- f) “VI” - escenario “inmersión”.

“T” indica un órgano o tejido como muestra el siguiente cuadro:

| Órgano o tejido           | Vía de exposición        | Número de referencia del tejido |                |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------|
|                           |                          | Enfoque experto                 | Enfoque riesgo |
| Tejido blando             | Fuente adyacente externa | 1                               | 1              |
| Médula roja               | Interna                  | 2                               | 2              |
| Regiones pulmonares       | Interna                  | 3E                              | 3R             |
| Colon o intestino delgado | Interna                  | 4                               | 4              |
| Tiroides                  | Interna                  | 5                               | 5              |
| Regiones de la piel       | Contacto con la piel     | 6E                              | 6R             |
| Torso                     | Fuente distante externa  | 7                               | 7              |

## ANEXO II SÍMBOLOS ESPECÍFICOS

La regla general para la indexación de las magnitudes dosimétricas utilizada en este informe se ilustra en la Figura 11.

| Símbolo               | Unidad         | Descripción  |
|-----------------------|----------------|--|
| $A_C$                 | Bq             | Límite de actividad de un radionucleido dado, basado en consideraciones de criticidad.   |
| $AD_T$                | Gy-Eq          | Dosis (absorbida) ponderada según EBR en un órgano o tejido T.   |
| $AD_T(\Delta)$        | Gy-Eq          | Dosis ponderada según EBR en un órgano o tejido T comprometida a lo largo del intervalo de tiempo $\Delta$ siguiente a la incorporación de un radionucleido.   |
| $AF_{T,S}$            | (Gy-Eq)/(Bqxs) | Factor de conversión de dosis igual a la tasa de dosis ponderada según EBR originada según el escenario S en el tejido T por 1 Bq de un radionucleido.   |
| $AF_{T,S}(\Delta)$    | (Gy-Eq)/Bq     | Factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR en el órgano o tejido T, comprometida conforme al escenario S, durante el intervalo de tiempo $\Delta$ siguiente a la incorporación de 1 Bq de un radionucleido.  |
| $AF_{1,I}$            | (Gy-Eq)/(Bqxs) | Factor de conversión de dosis igual a la tasa de dosis ponderada según EBR originada conforme al Escenario I en el Tejido 1 (tejido blando) por 1 Bq de un radionucleido.  |
| $AF_{7,II}$           | (Gy-Eq)/(Bqxs) | Factor de conversión de dosis igual a la tasa de dosis ponderada según EBR originada conforme al Escenario II en el Tejido 7 (torso) por 1 Bq de un radionucleido.   |
| $AF_{2,III}(\Delta)$  | (Gy-Eq)/Bq     | Factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días originada conforme al Escenario IIIR en el Tejido 2 (médula roja) a causa de la incorporación por inhalación de 1 Bq de un radionucleido.                              |
| $AF_{3R,III}(\Delta)$ | (Gy-Eq)/Bq     | Factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días originada conforme al Escenario IIIR en el Tejido 3R (región alveolar del tracto respiratorio) a causa de la incorporación por inhalación de 1 Bq de un radionucleido. |
| $AF_{4,III}(\Delta)$  | (Gy-Eq)/Bq     | Factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días originada conforme al Escenario IIIR en el Tejido 4 (colon) a causa de la incorporación por inhalación de 1 Bq de un radionucleido.                                    |
| $AF_{5,III}(\Delta)$  | (Gy-Eq)/Bq     | Factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 365 días originada conforme al Escenario IIIR en el Tejido 5 (tiroides) a causa de la incorporación por inhalación de 1 Bq de un radionucleido.                                |
| $AF_{2,IV}(\Delta)$   | (Gy-Eq)/Bq     | Factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días originada conforme al Escenario IV en el Tejido 2 (médula roja) a causa de la incorporación por ingestión de 1 Bq de un radionucleido.                                 |
| $AF_{4,IV}(\Delta)$   | (Gy-Eq)/Bq     | Factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días originada conforme al Escenario IV en el Tejido 4 (colon) a causa de la incorporación por ingestión de 1 Bq de un radionucleido.                                       |
| $AF_{5,IV}(\Delta)$   | (Gy-Eq)/Bq     | Factor de conversión de dosis igual a la dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 365 días originada conforme al Escenario IV en el Tejido 5 (tiroides) a causa de la incorporación por ingestión de 1 Bq de un radionucleido.                                   |

| <b>Símbolo</b>      | <b>Unidad</b>                       | <b>Descripción</b>   |
|---------------------|-------------------------------------|--|
| $AF_{6R,V}$         | (Gy-Eq)/<br>(Bq×s/cm <sup>2</sup> ) | Factor de conversión de dosis igual a la tasa de dosis ponderada según EBR en el Tejido 6R (dermis) originada conforme al Escenario V a causa de una unidad de actividad superficial de un radionucleido.  |
| $AF_{2,VI}$         | (Gy-Eq)/<br>(Bq×s/m <sup>3</sup> )  | Factor de conversión de dosis igual a la tasa de dosis ponderada según EBR en el Tejido 2 (médula roja) originada conforme al Escenario VI a causa de la inmersión en un gas noble radiactivo de concentración igual a una unidad.   |
| ${}^E A_I$          | Bq                                  | Actividad inicial de un radionucleido de una fuente no dispersada que, según el enfoque experto, se considera peligrosa si un individuo se expone a ella conforme al Escenario I.  |
| ${}^E A_{II}$       | Bq                                  | Actividad inicial de un radionucleido de una fuente no dispersada que, según el enfoque experto, se considera peligrosa si un individuo se expone a ella conforme al Escenario II.   |
| ${}^E A_{7,VI}$     | Bq                                  | Actividad inicial concreta de un gas noble radiactivo de una fuente dispersada que, según el enfoque experto, se considera que causa efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 7 (torso) si un individuo se expone a ella conforme al Escenario VI.                                |
| ${}^E A_{III E}$    | Bq                                  | Actividad inicial de un radionucleido de una fuente dispersada que, según el enfoque experto, se considera peligrosa si un individuo se expone a ella conforme al Escenario III E.   |
| ${}^E A_{2,III E}$  | Bq                                  | Actividad inicial concreta de un radionucleido de una fuente dispersada que, según el enfoque experto, se considera que causa efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 2 (médula roja) si un individuo se expone a ella conforme al Escenario III E.                              |
| ${}^E A_{3E,III E}$ | Bq                                  | Actividad inicial concreta de un radionucleido de una fuente dispersada que, según el enfoque experto, se considera que causa efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 3E (región torácica del tracto respiratorio) si un individuo se expone a ella conforme al Escenario III E. |
| ${}^E A_{5,III E}$  | Bq                                  | Actividad inicial concreta de un radionucleido de una fuente dispersada que, según el enfoque experto, se considera que causa efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 5 (tiroides) si un individuo se expone a ella conforme al Escenario III E.                                 |
| ${}^E A_{6E,V}$     | Bq                                  | Actividad inicial concreta de un radionucleido de una fuente dispersada que, según el enfoque experto, se considera que causa efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 6E (membrana basal de la piel) si un individuo se expone a ella conforme al Escenario V.                   |
| ${}^R A_I$          | Bq                                  | Actividad inicial de un radionucleido de una fuente no dispersada que, según el enfoque riesgo, se considera peligrosa si un individuo se expone a ella conforme al Escenario I.   |
| ${}^R A_{II}$       | Bq                                  | Actividad inicial de un radionucleido de una fuente no dispersada que, según el enfoque riesgo, se considera peligrosa si un individuo se expone a ella conforme al Escenario II.  |
| ${}^R A_{III R}$    | Bq                                  | Actividad inicial de un radionucleido de una fuente dispersada que, según el enfoque riesgo, se considera peligrosa si un individuo se expone a ella conforme al Escenario III R.  |
| ${}^R A_{T,III R}$  | Bq                                  | Actividad inicial concreta de un radionucleido de una fuente dispersada que, según el enfoque riesgo, se considera que causa efectos deterministas graves en la salud en el tejido T si un individuo se expone a ella conforme al Escenario III R.   |

| <b>Símbolo</b>       | <b>Unidad</b> | <b>Descripción</b>  |
|----------------------|---------------|---|
| ${}^R A_{IV}$        | Bq            | Actividad inicial de un radionucleido de una fuente dispersada que, según el enfoque riesgo, se considera peligrosa si un individuo se expone a ella conforme al Escenario IV.  |
| ${}^R A_{T,IV}$      | Bq            | Actividad inicial concreta de un radionucleido de una fuente dispersada que, según el enfoque riesgo, se considera que causa efectos deterministas graves en la salud en el tejido T si un individuo se expone a ella conforme al Escenario IV.   |
| ${}^R A_V$           | Bq            | Actividad inicial de un radionucleido de una fuente dispersada que, según el enfoque riesgo, se considera peligrosa si un individuo se expone a ella conforme al Escenario V.   |
| ${}^R A_{6R,V}$      | Bq            | Actividad inicial concreta de un radionucleido de una fuente dispersada que, según el enfoque riesgo, se considera que causa efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 6R (dermis) si un individuo se expone a ella conforme al Escenario V.  |
| ${}^R A_{VI}$        | Bq            | Actividad inicial de un gas noble radiactivo de una fuente dispersada que, según el enfoque riesgo, se considera peligrosa si un individuo se expone a ella conforme al Escenario VI.   |
| ${}^R A_{7,VI}$      | Bq            | Actividad inicial concreta de un gas noble radiactivo de una fuente dispersada que, según el enfoque riesgo, se considera que causa efectos deterministas graves en la salud en el Tejido 7 (torso) si un individuo se expone a ella conforme al Escenario VI.  |
| DAMA                 | $\mu\text{m}$ | Diámetro, en una distribución del tamaño aerodinámico de partículas, para el cual las actividades totales asociadas a las partículas de tamaño mayor o tamaño menor son iguales. Se supone por lo general una distribución lognormal del tamaño de las partículas. El 50% de la actividad del aerosol se asocia a las partículas de diámetro aerodinámico superior al DAMA (diámetro aerodinámico de la mediana de la actividad). |
| $D_T^R$              | Gy            | Dosis absorbida causada por la radiación R en un órgano o tejido T.   |
| $D_T^R(\Delta)$      | Gy            | Dosis absorbida causada por la radiación R en un órgano o tejido T comprometida a lo largo de un periodo de tiempo $\Delta$ siguiente a la incorporación de 1 Bq de un radionucleido.   |
| $\Delta$             | d             | Duración del tiempo de integración a raíz de la incorporación de material radiactivo utilizado para calcular la dosis absorbida comprometida, la dosis ponderada según EBR comprometida y la dosis de radiación ponderada comprometida.   |
| $DF_{T,S}^R$         | Gy/(Bqxs)     | Factor de conversión de dosis igual a la tasa de dosis absorbida de la radiación R originada según el escenario S en el tejido T por 1 Bq de un radionucleido.  |
| $DF_{1,I}^{L+H}$     | Gy/(Bqxs)     | Factor de conversión de dosis igual a la tasa de dosis absorbida causada por cualquier combinación de radiación de alta y baja TLE.   |
| $DF_{2,II}^{L+H}$    | Gy/(Bqxs)     | Factor de conversión de dosis igual a la tasa de dosis absorbida causada por cualquier combinación de radiación de alta y baja TLE originada según el Escenario II en el Tejido 2 (médula roja) por 1 Bq de un radionucleido  |
| $DF_{T,S}^R(\Delta)$ | Gy/Bq         | Factor de conversión de dosis igual a la dosis absorbida causada por la radiación R en el órgano o tejido T comprometida según el escenario S durante un intervalo de tiempo $\Delta$ siguiente a la incorporación de 1 Bq de un radionucleido.   |

| <b>Símbolo</b>             | <b>Unidad</b>              | <b>Descripción</b>   |
|----------------------------|----------------------------|--|
| $DF_{2,III}^{L+H}(\Delta)$ | Gy/Bq                      | Factor de conversión de dosis igual a la dosis absorbida comprometida a lo largo de 2 días causada por cualquier combinación de radiación de baja y alta TLE originada según el Escenario IIIE en el órgano o el Tejido 2 (médula roja), debida a la incorporación por inhalación de 1 Bq de un radionucleido.   |
| $DF_{3E,III}^{HS}(\Delta)$ | Gy/Bq                      | Factor de conversión de dosis igual a la dosis absorbida comprometida a lo largo de 365 días causada por radiación de alta TLE originada según el Escenario IIIE en el órgano o el Tejido 3E (región torácica del tracto respiratorio), debida a la incorporación de 1 Bq de aerosol de un radionucleido de periodo largo asignado a una inhalación de Tipo S. |
| $DF_{3E,III}^L(\Delta)$    | Gy/Bq                      | Factor de conversión de dosis igual a la dosis absorbida comprometida a lo largo de 2 días causada por radiación de baja TLE originada según el Escenario IIIE en el Tejido 3E (región torácica del tracto respiratorio), debida a la incorporación de 1 Bq de aerosol de un radionucleido que no pudo ser asignado a una inhalación de Tipo S.                |
| $DF_{3E,III}^{LS}(\Delta)$ | Gy/Bq                      | Factor de conversión de dosis igual a la dosis absorbida comprometida a lo largo de 365 días causada por radiación de baja TLE originada según el Escenario IIIE en el Tejido 3E (región torácica del tracto respiratorio), debida a la incorporación de 1 Bq de aerosol insoluble de un radionucleido de periodo largo.                                       |
| $DF_{5,III}^L(\Delta)$     | Gy/Bq                      | Factor de conversión de dosis igual a la dosis absorbida comprometida a lo largo de 365 días causada por radiación de baja TLE originada según el Escenario IIIE en el Tejido 5 (tiroides), debida a la incorporación de 1 Bq de un radionucleido tiroidótrofo.  |
| $DF_{6E,V}^L$              | Gy/(Bqxs/cm <sup>2</sup> ) | Factor de conversión de dosis igual a la tasa de dosis absorbida causada por radiación de baja TLE en el Tejido 6E (membrana basal de la piel) originada según el Escenario V, debida a una unidad de contaminación superficial de un radionucleido.   |
| $DF_{2,VI}^L$              | Gy/(Bqxs/m <sup>3</sup> )  | Factor de conversión de dosis igual a la tasa de dosis absorbida causada por radiación de baja TLE en el Tejido 2 (médula roja) originada según el Escenario VI, debida a la inmersión en un gas noble radiactivo de una concentración igual a una unidad.   |
| $DF_{T,S}^R(\Delta)$       | Gy/Bq                      | Factor de conversión de dosis igual a la dosis absorbida comprometida causada por la radiación R en el órgano o tejido T según el escenario S, para una incorporación de 1 Bq de un radionucleido.   |
| ${}^E D_1$                 | Bq                         | Valor $D_1$ de un radionucleido calculado utilizando el enfoque experto.   |
| ${}^E D_2$                 | Bq                         | Valor $D_2$ de un radionucleido calculado utilizando el enfoque experto.   |
| ${}^R D_1$                 | Bq                         | Valor $D_1$ de un radionucleido calculado utilizando el enfoque riesgo.  |
| ${}^R D_2$                 | Bq                         | Valor $D_2$ de un radionucleido calculado utilizando el enfoque riesgo.  |
| E                          | Sv                         | Dosis efectiva.  |
| $F_{III}$                  |                            | Fracción inhalada de material radiactivo dispersado según el Escenario III.  |
| $F_{IV}$                   |                            | Fracción ingerida de material radiactivo dispersado según el Escenario IV.   |
| $F_V$                      |                            | Fracción dispersada de material radiactivo según el Escenario V.   |
| $F_{VI}$                   |                            | Fracción dispersada de material radiactivo según el Escenario VI.  |

| <b>Símbolo</b>         | <b>Unidad</b> | <b>Descripción</b>  |
|------------------------|---------------|---|
| $H_T$                  | Sv            | Dosis de radiación (absorbida) ponderada en un órgano o tejido.   |
| $H_T(\tau)$            | Sv            | Dosis de radiación ponderada comprometida en un órgano o tejido T después de la incorporación de un radionucleido.  |
| I                      | Bq            | Magnitud de la incorporación de un radionucleido.   |
| LET                    | keV/ $\mu$ m  | Transferencia lineal total promediada de energía (TLE) de la radiación ionizante en agua líquida.   |
| $M_S$                  | g             | Límite de la masa de material radiactivo en el Escenario S. Si la masa de material de una actividad concreta sobrepasaba este límite, el radionucleido se consideró ilimitado.  |
| $R_V$                  |               | Razón entre la contaminación de la piel y la contaminación primaria de un objeto o superficie, según el Escenario V.  |
| $RBE_T^R$              | (Gy-Eq)/Gy    | Coefficiente de eficacia biológica relativa. Es la relación entre la dosis absorbida causada por una radiación de referencia que produce un determinado efecto biológico en un órgano o tejido dado T, y la dosis absorbida causada por la radiación de interés R que produzca el mismo efecto biológico.   |
| $RD_1^{L+H}$           | Gy            | Nivel de referencia de dosis absorbida de cualquier radiación en el Tejido 1 (tejido blando) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud por exposición local externa.   |
| $RD_7^{L+H}$           | Gy            | Nivel de referencia de dosis absorbida de cualquier radiación en el Tejido 7 (torso) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud por exposición externa de todo el cuerpo a una fuente distante.   |
| $RD_2^{L+H}(\Delta)$   | Gy            | Nivel de referencia de dosis absorbida comprometida a lo largo de 2 días causada por cualquier radiación en el Tejido 2 (médula roja) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud por exposición interna.  |
| $RD_{3E}^{HS}(\Delta)$ | Gy            | Nivel de referencia de dosis absorbida comprometida en el Tejido 3E (región torácica del tracto respiratorio) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud debidos a la incorporación por inhalación de un radionucleido de periodo largo emisor de radiación de alta TLE con lenta eliminación biológica por el pulmón.                        |
| $RD_{3E}^L(\Delta)$    | Gy            | Nivel de referencia de dosis absorbida comprometida a lo largo de 2 días en el Tejido 3E (región torácica del tracto respiratorio) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud debidos a la incorporación por inhalación de un radionucleido emisor de radiación de baja TLE que no pudo ser asignado al grupo de lenta eliminación biológica. |
| $RD_{3E}^{LS}(\Delta)$ | Gy            | Nivel de referencia de dosis absorbida comprometida a lo largo de 365 días en el Tejido 3E (región torácica del tracto respiratorio) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud debidos a la incorporación por inhalación de un radionucleido de periodo largo emisor de radiación de baja TLE con lenta eliminación biológica por el pulmón. |
| $RD_5^L(\Delta)$       | Gy            | Nivel de referencia de dosis absorbida comprometida a lo largo de 365 días en el Tejido 5 (tiroides) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud debidos a la incorporación por inhalación de un radionucleido tiroidótrofo emisor de radiación de baja TLE.   |
| $RD_{6E}^L$            | Gy            | Nivel de referencia de dosis absorbida causada por radiación de baja TLE en el Tejido 6E (membrana basal de la piel) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud por contaminación de la piel.   |

| <b>Símbolo</b>    | <b>Unidad</b> | <b>Descripción</b>   |
|-------------------|---------------|--|
| $S_V$             | $m^2$         | Área de contaminación primaria debida a la dispersión de material radiactivo según el Escenario V.   |
| $TD_1$            | Gy-Eq         | Nivel umbral de la dosis ponderada según EBR en el Tejido 1 (tejido blando) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud por exposición local externa de tejido blando.  |
| $TD_7$            | Gy-Eq         | Nivel umbral de la dosis ponderada según EBR en el Tejido 7 (torso) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud por exposición externa de todo el cuerpo a una fuente distante.   |
| $TD_2(\Delta)$    | Gy-Eq         | Nivel umbral de dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días en el Tejido 2 (médula roja) para el desarrollo efectos deterministas graves en la salud por incorporación de un radionucleido.                                 |
| $TD_{3R}(\Delta)$ | Gy-Eq         | Nivel umbral de dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días en el Tejido 3R (región alveolar del tracto respiratorio) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud por incorporación de un radionucleido. |
| $TD_4(\Delta)$    | Gy-Eq         | Nivel umbral de dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 30 días en el Tejido 4 (colon) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud por incorporación de un radionucleido.                                    |
| $TD_5(\Delta)$    | Gy-Eq         | Nivel umbral de dosis ponderada según EBR comprometida a lo largo de 365 días en el Tejido 5 (tiroides) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud por incorporación de un radionucleido.                                |
| $TD_{6R}$         | Gy-Eq         | Nivel umbral de dosis ponderada según EBR en el Tejido 6R (dermis) para el desarrollo de efectos deterministas graves en la salud debidos a exposición por contacto a contaminación de la piel.  |
| $T_S$             | s             | Tiempo de exposición igual al periodo de irradiación definido por el escenario de exposición S.  |
| $V_{VI}$          | $m^3$         | Volumen de una habitación donde se libera un gas noble radiactivo según el Escenario VI.   |
| $w_R$             | Sv/Gy         | Factor de ponderación de la radiación.   |



## COLABORADORES EN LA PREPARACIÓN Y EXAMEN

|              |   |
|--------------|---|
| Buglova, E.  | Organismo Internacional de Energía Atómica  |
| Dodd, B.     | BD Consulting, Las Vegas, NV (Estados Unidos de América)                                |
| Eckerman, K. | Laboratorio Nacional de Oak Ridge, Oak Ridge, TN (Estados Unidos de América)            |
| Koukhta, B.  | Centro Estatal de Investigaciones "Instituto de Biofísica", Moscú (Federación de Rusia) |
| Kutkov, V.   | Centro de Investigación Ruso "Instituto Kurchatov", Moscú (Federación de Rusia)         |
| McKenna, T.  | Organismo Internacional de Energía Atómica  |
| Wheatley, J. | Organismo Internacional de Energía Atómica  |





# IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Nº 22

## Lugares donde se pueden encargar publicaciones del OIEA

En los siguientes países se pueden adquirir publicaciones del OIEA de los proveedores que figuran a continuación, o en las principales librerías locales. El pago se puede efectuar en moneda local o con bonos de la UNESCO.

### ALEMANIA

UNO-Verlag, Vertriebs- und Verlags GmbH, Am Hofgarten 10, D-53113 Bonn  
Teléfono: + 49 228 94 90 20 • Fax: +49 228 94 90 20 ó +49 228 94 90 222  
Correo-e: [bestellung@uno-verlag.de](mailto:bestellung@uno-verlag.de) • Sitio web: <http://www.uno-verlag.de>

### AUSTRALIA

DA Information Services, 648 Whitehorse Road, MITCHAM 3132  
Teléfono: +61 3 9210 7777 • Fax: +61 3 9210 7788  
Correo-e: [service@dadirect.com.au](mailto:service@dadirect.com.au) • Sitio web: <http://www.dadirect.com.au>

### BÉLGICA

Jean de Lannoy, avenue du Roi 202, B-1190 Bruselas  
Teléfono: +32 2 538 43 08 • Fax: +32 2 538 08 41  
Correo-e: [jean.de.lannoy@infoboard.be](mailto:jean.de.lannoy@infoboard.be) • Sitio web: <http://www.jean-de-lannoy.be>

### CANADÁ

Bernan Associates, 4501 Forbes Blvd, Suite 200, Lanham, MD 20706-4346, EE.UU.  
Teléfono: 1-800-865-3457 • Fax: 1-800-865-3450  
Correo-e: [customercare@bernan.com](mailto:customercare@bernan.com) • Sitio web: <http://www.bernan.com>

Renouf Publishing Company Ltd., 1-5369 Canotek Rd., Ottawa, Ontario, K1J 9J3  
Teléfono: +613 745 2665 • Fax: +613 745 7660  
Correo-e: [order.dept@renoufbooks.com](mailto:order.dept@renoufbooks.com) • Sitio web: <http://www.renoufbooks.com>

### CHINA

Publicaciones del OIEA en chino: China Nuclear Energy Industry Corporation, Sección de Traducción  
P.O. Box 2103, Beijing

### ESLOVENIA

Cankarjeva Založba d.d., Kopitarjeva 2, SI-1512 Ljubljana  
Teléfono: +386 1 432 31 44 • Fax: +386 1 230 14 35  
Correo-e: [import.books@cankarjeva-z.si](mailto:import.books@cankarjeva-z.si) • Sitio web: <http://www.cankarjeva-z.si/uvvoz>

### ESPAÑA

Díaz de Santos, S.A., c/ Juan Bravo, 3A, E-28006 Madrid  
Teléfono: +34 91 781 94 80 • Fax: +34 91 575 55 63  
Correo-e: [compras@diazdesantos.es](mailto:compras@diazdesantos.es), [carmela@diazdesantos.es](mailto:carmela@diazdesantos.es), [barcelona@diazdesantos.es](mailto:barcelona@diazdesantos.es), [julio@diazdesantos.es](mailto:julio@diazdesantos.es)  
Sitio web: <http://www.diazdesantos.es>

### ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Bernan Associates, 4501 Forbes Blvd., Suite 200, Lanham, MD 20706-4346, EE.UU.  
Teléfono: 1-800-865-3457 • Fax: 1-800-865-3450  
Correo-e: [customercare@bernan.com](mailto:customercare@bernan.com) • Sitio web: <http://www.bernan.com>

Renouf Publishing Company Ltd., 812 Proctor Ave., Ogdensburg, NY, 13669, EE.UU.  
Teléfono: +888 551 7470 (gratuito) • Fax: +888 568 8546 (gratuito)  
Correo-e: [order.dept@renoufbooks.com](mailto:order.dept@renoufbooks.com) • Sitio web: <http://www.renoufbooks.com>

### FINLANDIA

Akateeminen Kirjakauppa, P.O. BOX 128 (Keskuskatu 1), FIN-00101 Helsinki  
Teléfono: +358 9 121 41 • Fax: +358 9 121 4450  
Correo-e: [akatilaus@akateeminen.com](mailto:akatilaus@akateeminen.com) • Sitio web: <http://www.akateeminen.com>

### FRANCIA

Form-Edit, 5, rue Janssen, P.O. Box 25, F-75921 París Cedex 19  
Teléfono: +33 1 42 01 49 49 • Fax: +33 1 42 01 90 90  
Correo-e: [formedit@formedit.fr](mailto:formedit@formedit.fr) • Sitio web: <http://www.formedit.fr>

Lavoisier SAS, 145 rue de Provigny, 94236 Cachan Cedex  
Teléfono: + 33 1 47 40 67 02 • Fax +33 1 47 40 67 02  
Correo-e: [romuald.verrier@lavoisier.fr](mailto:romuald.verrier@lavoisier.fr) • Sitio web: <http://www.lavoisier.fr>

## **HUNGRÍA**

Librotrade Ltd., Book Import, P.O. Box 126, H-1656 Budapest  
Teléfono: +36 1 257 7777 • Fax: +36 1 257 7472 • Correo-e: books@librotrade.hu

## **INDIA**

Allied Publishers Group, 1st Floor, Dubash House, 15, J. N. Heredia Marg, Ballard Estate, Mumbai 400 001  
Teléfono: +91 22 22617926/27 • Fax: +91 22 22617928  
Correo-e: alliedpl@vsnl.com • Sitio web: <http://www.alliedpublishers.com>

Bookwell, 2/72, Nirankari Colony, Delhi 110009  
Teléfono: +91 11 23268786, +91 11 23257264 • Fax: +91 11 23281315  
Correo-e: bookwell@vsnl.net

## **ITALIA**

Libreria Scientifica Dott. Lucio di Biasio "AEIOU", Via Coronelli 6, I-20146 Milán  
Teléfono: +39 02 48 95 45 52 ó 48 95 45 62 • Fax: +39 02 48 95 45 48  
Correo-e: info@libreriaaeiou.eu • Sitio web: [www.libreriaaeiou.eu](http://www.libreriaaeiou.eu)

## **JAPÓN**

Maruzen Company, Ltd., 13-6 Nihonbashi, 3 chome, Chuo-ku, Tokyo 103-0027  
Teléfono: +81 3 3275 8582 • Fax: +81 3 3275 9072  
Correo-e: journal@maruzen.co.jp • Sitio web: <http://www.maruzen.co.jp>

## **NACIONES UNIDAS**

Dept. 1004, Room DC2-0853, First Avenue at 46th Street, Nueva York, N.Y. 10017, EE.UU.  
Teléfono (Naciones Unidas): +800 253-9646 ó +212 963-8302 • Fax: +212 963 -3489  
Correo-e: publications@un.org • Sitio web: <http://www.un.org>

## **NUEVA ZELANDIA**

DA Information Services, 648 Whitehorse Road, MITCHAM 3132, Australia  
Teléfono: +61 3 9210 7777 • Fax: +61 3 9210 7788  
Correo-e: service@dadirect.com.au • Sitio web: <http://www.dadirect.com.au>

## **PAÍSES BAJOS**

De Lindeboom Internationale Publicaties B.V., M.A. de Ruyterstraat 20A, NL-7482 BZ Haaksbergen  
Teléfono: +31 (0) 53 5740004 • Fax: +31 (0) 53 5729296  
Correo-e: books@delindeboom.com • Sitio web: <http://www.delindeboom.com>

Martinus Nijhoff International, Koraalrood 50, P.O. Box 1853, 2700 CZ Zoetermeer  
Teléfono: +31 793 684 400 • Fax: +31 793 615 698  
Correo-e: info@nijhoff.nl • Sitio web: <http://www.nijhoff.nl>

Swets and Zeitlinger b.v., P.O. Box 830, 2160 SZ Lisse  
Teléfono: +31 252 435 111 • Fax: +31 252 415 888  
Correo-e: infoho@swets.nl • Sitio web: <http://www.swets.nl>

## **REINO UNIDO**

The Stationery Office Ltd, International Sales Agency, P.O. Box 29, Norwich, NR3 1 GN  
Teléfono (pedidos) +44 870 600 5552 • (información): +44 207 873 8372 • Fax: +44 207 873 8203  
Correo-e (pedidos): book.orders@tso.co.uk • (información): book.enquiries@tso.co.uk • Sitio web: <http://www.tso.co.uk>

Pedidos en línea

DELTA Int. Book Wholesalers Ltd., 39 Alexandra Road, Addlestone, Surrey, KT15 2PQ  
Correo-e: info@profbooks.com • Sitio web: <http://www.profbooks.com>

Libros relacionados con el medio ambiente

Earthprint Ltd., P.O. Box 119, Stevenage SG1 4TP  
Teléfono: +44 1438748111 • Fax: +44 1438748844  
Correo-e: orders@earthprint.com • Sitio web: <http://www.earthprint.com>

## **REPÚBLICA CHECA**

Suweco CZ, S.R.O., Klecakova 347, 180 21 Praga 9  
Teléfono: +420 26603 5364 • Fax: +420 28482 1646  
Correo-e: nakup@suweco.cz • Sitio web: <http://www.suweco.cz>

## **REPÚBLICA DE COREA**

KINS Inc., Information Business Dept. Samho Bldg. 2nd Floor, 275-1 Yang Jae-dong SeoCho-G, Seúl 137-130  
Teléfono: +02 589 1740 • Fax: +02 589 1746 • Sitio web: <http://www.kins.re.kr>

**Los pedidos y las solicitudes de información también se pueden dirigir directamente a:**

### **Dependencia de Mercadotecnia y Venta, Organismo Internacional de Energía Atómica**

Centro Internacional de Viena, P.O. Box 100, 1400 Viena, Austria  
Teléfono: +43 1 2600 22529 (ó 22530) • Fax: +43 1 2600 29302  
Correo-e: sales.publications@iaea.org • Sitio web: <http://www.iaea.org/books>





