SOCIEDAD ESPAÑOLA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

TRADUCCIÓN DEL DOCUMENTO

Guía IDEAS (Versión 2) para la estimación de la Dosis Comprometida a partir de los Datos de la Vigilancia de la Incorporación

EURADOS Report 2013-01,
Braunchweig, March 2013

EURADOS
European Radiation Dosimetry Group e. V.

Autores original: C. M. Castellani, J. W. Marsh, C. Hurtgen, E. Blanchardon, P. Berard, A. Giussani, M. A. López

Autores traducción: E. Sollet Sañudo, B. Bravo Pérez-Tinao, J. Tenajas Polo, P. Marchena González

Original impreso por © EURADOS 2013
ISSN 2226-B067
ISBN 978-3-943701-03-6

Editado por:
European Radiation Dosimetry e. V.
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
Alemania
office@eurados.org
www.eurados.org

EURADOS (European Radiation Dosimetry e.V.) es una organización sin ánimo de lucro que promueve la investigación y desarrollo y la cooperación europea en el campo de la dosimetría de la radiación ionizante. Está registrada en el Registro de Asociaciones (Amtsgericht Braunschweig, número de registro VR 200387) y certificada sin ánimo de lucro (Finanzamt Braunschweig-Altewiekring, notificación de 03-03-2008).

Disclaimer: The authors of the original document are not responsible for any misunderstanding associated to the translation.

Traducción autorizada por EURADOS y editada por:
© Sociedad Española de Protección Radiológica
Capitán Haya, 56 - 28020 Madrid
ISBN: 978-84-608-7956-5

Sociedad Española de Protección Radiológica
Mayo, 2016
www.sepr.es



Sociedad Española de Protección Radiológica (S.E.P.R.)

Y la colaboración de:
Sociedad Argentina de Radioprotección (S.A.R.)

Traducción del documento:

Guía IDEAS (Versión 2) para la Estimación de la Dosis Comprometida a partir de los Datos de la Vigilancia de la Incorporación

Grupo de trabajo de traducción

Coordinador: Eduardo Sollet Sañudo[1]
Participantes: Borja Bravo Pérez-Tinao[2], Javier Tenajas Polo[2], Paloma Marchena González[2]
[1] *Iberdrola, Central Nuclear de Cofrentes*
[2] *Tecnatom, Servicio de Dosimetría Personal Interna*

Revisores: Ana María Rojo[3], Inés Gómez Parada[3], Teresa Navarro Bravo[4], María Antonia López Ponte[4]
[3] *Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina*
[4] *CIEMAT*

Madrid, Mayo 2016

Entidades colaboradoras:

Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. (ENRESA)
Iberdrola, Central Nuclear de Cofrentes
Tecnatom, S.A.
Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Técnológicas (CIEMAT)
Asociación Española de la Industria Eléctrica (UNESA)
Empresa Nacional del Uranio, S.A. (ENUSA)

Prólogo de la edición traducida:

En marzo de 2013, el Grupo de Trabajo de EURADOS sobre "Dosimetría Interna" (Task group 7.1) editó la segunda versión del informe “Guías generales para la estimación de la dosis efectiva comprometida a partir de datos de vigilancia de la incorporación de radionucleidos (***Guía IDEAS***)”. El objetivo principal del documento era proponer unos procedimientos normalizados para la estimación de la dosis efectiva comprometida. El seguimiento de las directrices de la Guía asegura una armonización de los procedimientos y la “mejor” estimación de la dosis a partir de los datos disponibles. La complejidad de las metodologías recomendadas se adapta a los niveles de dosis. Es un documento muy completo que recoge el estado del arte actual en el ámbito de la dosimetría interna, considerando las distintas vías de incorporación e incluyendo algunos ejemplos prácticos para su implementación.

Representantes del sector nuclear de la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR) se ofrecieron para llevar a cabo la traducción del documento para su edición como una guía técnica de la Sociedad. Desde la Comisión de Actividades Científicas y la Junta Directiva de la SEPR acogimos muy positivamente la iniciativa y agradecimos el esfuerzo desinteresado de los autores. Paralelamente, la sociedad argentina de protección radiológica (SAR) nos manifestó su interés en poder colaborar en la misma y se ofrecieron para llevar a cabo una revisión de la misma. Las sociedades españolas y argentinas de protección radiológica tienen larga experiencia en colaborar en la traducción de documentos técnicos del ámbito de la protección radiológica. Disponer de material técnico en la lengua propia facilita la formación de los profesionales y una mayor difusión de las recomendaciones internacionales. La edición de la traducción al español de la Guía IDEAS es pues un nuevo ejemplo de colaboración entre la SAR y la SEPR que se enmarca en las líneas estratégicas de la SEPR de potenciar nuestro papel como referente para la incorporación en España de los nuevos desarrollos en materia de protección radiológica y de difundir dichos desarrollos, así como nuestra voluntad de servir a los socios y a la sociedad. En este sentido, confiamos que este documento facilite una mejor armonización en la estimación de la dosis por incorporación interna que redunde en una mejor protección radiológica de los trabajadores y el público.

La Dirección de EURADOS y los autores del documento original han autorizado la presente traducción en lengua española y han manifestado su satisfacción de que la Guía IDEAS de EURADOS se divulgue en otros países.

En nombre de la SEPR quiero agradecer profundamente el excelente trabajo realizado al coordinador del grupo de trabajo Eduardo Sollet Sañudo y a los co-autores Borja Bravo Pérez-Tinao, Javier Tenajas Polo y Paloma Marchena González. También queremos expresar nuestra gratitud a la SAR por su colaboración y a Ana María Rojo e Inés Gómez Parada y Teresa Navarro Bravo y María Antonia López Ponte por su exhaustiva revisión del texto. Finalmente, agradecemos a las entidades colaboradoras sus aportaciones para la edición de esta nueva guía.

Mercè Ginjaume
Presidenta SEPR

EURADOS
European Radiation Dosimetry Group e. V.

Translation of Eurados-2013-01
Braunschweig, marzo 2013

Guía IDEAS (Versión 2) para la Estimación de la Dosis Comprometida a partir de los Datos de la Vigilancia de la Incorporación

Trabajo del sub-grupo 7.1
"Actualización de la Guía IDEAS y bases de datos"
del Grupo de Trabajo WG7 de EURADOS
"Dosimetría Interna"

C.M. Castellani[1], J. W. Marsh[2], C. Hurtgen[3],
E. Blanchardon[4], P. Berard[5], A. Giussani[6],
M. A. López[7]

[1] ENEA, Italia
[2] HPA-RPD, Reino Unido
[3] SCK.CEN, Bélgica
[4] IRSN, Francia
[5] CEA, Francia
[6] BfS, Alemania
[7] CIEMAT, España

Editorial

Este informe es la versión 2 del informe "Guías Generales para la Estimación de la Dosis Efectiva Comprometida a partir de Datos de Vigilancia de la Incorporación (***Guía IDEAS***)" editada como Forschungszentrum Karlsruhe Wissenschaftliche Berichte FZKA 7243 en el año 2006. Muchas partes de este informe se han tomado del informe anterior FZKA 7243 y por ello se expresa un reconocimiento a los autores de aquel informe: H. Doerfel, A. Andrasi, M. Bailey, V. Berkovski, B. Le Guen, I. Malatova y J. Stather.

Reconocimiento

Los autores quieren agradecer a G. Etherington (HPA-RPD RU) por proporcionar el texto que describe la norma ISO 27048 sobre la evaluación de la dosis interna y agradecer también a D. Gregoratto (HPA-RPD RU) por proporcionar el texto que describe las pruebas estadísticas de autocorrelación (Anexo 14) y el cálculo de los valores de la tabla 1.7.

También se quiere agradecer a T. Vrba (Universidad Técnica Checa en Praga CZ) por proporcionar el texto relacionado con las incertidumbres en las medidas en cráneo.

Finalmente también se quiere reconocer la contribución de A. Andrasi (KFKL, Hungría) e I. Malatova (Suro, República Checa) por sus sugerencias, comentarios y provechoso intercambio de ideas durante la revisión del documento.

ÍNDICE

ÍNDICE . ..... *i*

Definiciones ..... *iv*

Resumen ..... *xiv*

1. Introducción *1*

1.1. El proyecto IDEAS 1

1.1.1 Introducción 1

1.1.2 El ejercicio de Intercomparación IDEAS/OIEA 2

1.1.3 La guía IDEAS 2006 3

1.2. Documentación reciente de referencia para la evaluación de la exposición interna 5

1.2.1 Las Recomendaciones de ICRP del año 2007 – Dosis Efectiva 5

1.2.2 Modelo para el Tracto Alimentario del ser Humano (HATM) 7

1.2.3 Datos Físicos para el Cálculo de Dosis 9

1.2.4 Maniquíes Computacionales del Adulto de Referencia 9

1.2.5 Modelo para Heridas de la NCRP 10

1.2.6 La Norma ISO 27048 (2011) 17

1.2.7 Próximos documentos de ICRP sobre la Incorporación Ocupacional de Radionucleidos (OIR) 19

1.3. Actividades desarrolladas con las redes europeas CONRAD y EURADOS 21

1.3.1 Actividades dentro de CONRAD 21

1.3.2 Curso de entrenamiento EURADOS/IAEA 22

1.4 Revisión de la guía IDEAS 23

2. Generalidades de la guía IDEAS *24*

2.1. Principios 24

2.1.1 Armonización 25

2.1.2 Exactitud 25

2.1.3 Proporcionalidad 25

2.2. Niveles de tareas 26

2.2.1 Nivel 0 (dosis efectiva comprometida menor de 0,1 mSv/año) 26

2.2.2 Nivel 1 (0,1 mSv/año < dosis efectiva comprometida < 1 mSv) 26

2.2.3 Nivel 2 (1 mSv < dosis efectiva comprometida < 6 mSv) 27

2.2.4 Nivel 3 (dosis efectiva comprometida ≥ 6 mSv) 27

3. Programas de vigilancia *28*

3.1. Objetivos y naturaleza de los programas de vigilancia 28

3.2. Umbral de decisión y límite de detección 29

3.3. Determinación de los valores Mc 34

4. Tratamiento de los datos de las medidas *38*

4.1. Obtención y tratamiento de datos antes de su utilización 38

4.1.1 Normalización de las medidas de actividad 38

4.1.2 Exposición a múltiples radionucleidos 39

4.1.3 Sustracción del fondo debido a la dieta 39

4.2. Evaluación de incertidumbres 43

5. Interpretación de los resultados de las medidas *51*
5.1. Introducción 51
5.2. Medidas únicas, incorporaciones únicas 51
5.3. Múltiples medidas 53
5.4. Exposiciones prolongadas 55

6. Aspectos especiales del tratamiento de datos *58*
6.1. Identificación de datos fuera de rango 58
6.2. Tratamiento de datos por debajo del límite de detección 59
6.3. Criterios para rechazar un ajuste 59
6.4. Influencia de las terapias de desincorporación 62
6.5. Número y tipo de datos requeridos para la evaluación de dosis 62
6.6. Evaluación del crecimiento (incremento de actividad) del Am-241 procedente del Pu-241 64

7. Proceso estructurado *67*
7.1. Introducción 67
7.2. Todas las exposiciones (Etapa 1) 67
7.3. Todas las exposiciones por encima del Nivel 0: Comprobar la relevancia de las medidas nuevas y su consistencia con evaluaciones previas. (Etapa 2) 69
7.4. Procedimiento normal (estándar) de evaluación para el Nivel 1 (Etapa 3) 72
7.5. Identificación de la vía de incorporación para una evaluación especial superior al Nivel 1 (Etapa 4) 76

8. Inhalación (Etapa 5) *78*
8.1. Aspectos generales 78
8.2. Evaluación simple (Etapa 5A) 80
8.3. Parámetros asociados a la exposición (Etapa 5B) 83
8.4. Evaluación avanzada (Etapa 5C) 92

9. Ingestión (Etapa 6) *96*
9.1. Aspectos generales 96
9.2. Evaluación sencilla (Etapa 6A) 98
9.3. Parámetros asociados a la exposición (Etapa 6B) 101
9.4. Evaluación avanzada (Etapa 6C) 104

10. Mezcla de inhalación e ingestión (Etapa 7) *108*
10.1 Aspectos generales 108
10.2 Evaluación sencilla (Etapa 7A) 110
10.3 Parámetros asociados a la exposición (Etapa 7B) 113
10.4 Evaluación avanzada (Etapa 7C) 121

11. Heridas (Etapa 8) *124*
11.1 Introducción 124
11.2 Asignación de una categoría por defecto (Etapa 8A) 124
11.3 Ajuste con las categorías por defecto (Etapa 8B) 127
11.4 Combinación de dos de las categorías por defecto del modelo NCRP para heridas (Etapa 8C) 130

12. Casos especiales con evaluación directa de la dosis *133*
12.1 Teoría 133
12.2 Aplicación de la evaluación directa de la dosis a la incorporación de agua tritiada 135

13. Ejemplos de casos prácticos *139*
13.1 Inhalación crónica de I-125 (Caso ELP1) 139
13.2 Inhalación única de Uranio enriquecido (Caso ELP2) 145
13.3 Inhalación única de Am-241 (Caso ELP3) 152
13.4 Ingestión de Cs-137 (Caso ELP4) 161

14. Anexos *170*
14.1 Anexo 1 - Composición isotópica del Uranio natural, enriquecido y empobrecido y de materiales con Plutonio que se encuentran en la industria nuclear 170
14.2 Anexo 2 - Ajuste de datos 175
14.2.1 Función de probabilidada 175
14.2.2 Función de probabilidad para medidas “menores que” 177
14.2.3 Método de la máxima probabilidad 178
14.2.4 Extensión a múltiples incorporaciones 180
14.3 Anexo 3 – Prueba estadística de autocorrelación 182
14.4 Anexo 4 – Evaluación manual del valor-p 185

15. Referencias *187*

Abreviaturas y símbolos *199*

Definiciones

Absorción

Movimiento del material a la sangre independientemente del mecanismo que lo produce. En el tracto respiratorio se refiere generalmente a la disociación de las partículas y a la asimilación en sangre de las substancias solubles y del material disociado de las partículas.

Actividad

Magnitud física para designar el número de transformaciones nucleares por segundo de un material radiactivo. Su unidad en el sistema internacional (***SI***) es el ***Bequerelio***: 1 Bq = 1 s^{-1}

AMAD – Diámetro Aerodinámico de la Mediana de Actividad

Parámetro físico que describe el tamaño de las partículas de los aerosoles radiactivos. El 50% de la actividad en el aerosol está asociado con partículas de diámetro aerodinámico (d_{ae}) mayor que el ***AMAD***. El ***AMAD*** se utiliza para tamaños de partículas para las que su depósito depende principalmente del impacto inercial y de la sedimentación; generalmente para aquellas mayores de ***0,5 micras***. Para partículas más pequeñas, su depósito depende principalmente de la difusión y para ellas se define de forma análoga al AMAD, el ***AMTD Diámetro Termodinámico de la Mediana de Actividad*** en referencia a su diámetro termodinámico.

Análisis de Excretas

Procedimiento para la evaluación de la actividad en orina, heces o en el aire exhalado. El análisis de excretas incluye separaciones radioquímicas, preparación de las muestras a medir y la evaluación cuantitativa de la actividad de las muestras mediante técnicas espectrométricas u otras (por ejemplo, espectrometría α o ***ICP-MASAS***).

Absorción (Uptake)

El proceso por el cual entran a los fluidos corporales los radionucleidos procedentes del tracto respiratorio, tracto gastrointestinal o a través de la piel, o la fracción de una incorporación que entra en los fluidos corporales por estos procesos.

Bioensayo

Cualquier procedimiento utilizado para determinar la naturaleza, actividad, localización o retención de un radionucleido en el organismo mediante medidas directas (***in vivo***) o indirectas (***in vitro***) a través del análisis del material excretado o eliminado del cuerpo por cualquier otro método.

Coeficiente de Dosis

Dosis equivalente comprometida en un órgano o tejido ***T*** por unidad de incorporación, $h_T(\tau)$ o dosis efectiva comprometida $e(\tau)$ por unidad de incorporación, en las que τ es el periodo de tiempo sobre el que se calcula la dosis. Para adultos el tiempo de integración es de ***50*** años.

Compartimento

Receptáculo de material radiactivo en el cuerpo que puede ser caracterizado por una cinética de primer orden. Un compartimento puede ser un órgano (por ejemplo el hígado), una parte de un órgano (por ejemplo la región de los bronquios de los pulmones), un tejido (por ejemplo los huesos) una parte de un tejido (por ejemplo la superficie ósea) u otra substancia del cuerpo (por ejemplo los fluidos corporales). Se considera que dentro de un compartimento, la actividad está distribuida uniformemente.

Compartimento de Transferencia

Compartimento introducido en los modelos biocinéticos utilizados por ***ICRP*** y ***OIEA*** por conveniencia matemática para tener en cuenta el movimiento del material radiactivo a los fluidos corporales y desde ahí repartirse y depositarse en los órganos y tejidos del cuerpo. Por simplicidad y conveniencia se asocia a la sangre.

Datos fuera de rango

Los datos fuera de rango (***outliers*** en inglés) son datos numéricamente distantes del resto de datos. En otras palabras, un dato fuera de rango es uno que parece que de desvía marcadamente del resto de datos de la serie o muestra que los contiene. Se considera que un dato es fuera de rango si no forma parte de la población de datos de la muestra de la que sí forman parte el resto de datos. En el caso de bioensayo, datos fuera de rango por encima o por debajo de la tendencia del resto de datos, tienen diferente significación (ver ***Apartado 6.1***)

Depósito

Proceso inicial que determina cuánto material presente en el aire inhalado permanece en el tracto respiratorio tras la exhalación. El depósito del material puede ocurrir tanto en la fase de inhalación como en la de exhalación. La distribución del depósito del material inhalado en las diferentes regiones del tracto respiratorio depende de factores tales como el AMAD y los hábitos de respiración de la persona.

La ***Publicación 66*** de ***ICRP*** establece tres clases de gases y vapores en función de sus patrones iniciales de depósito en el tracto respiratorio: Clase ***SR-1*** (solubles o reactivos: depósito a lo largo de todo el tracto respiratorio), Clase ***SR-2*** (muy solubles o reactivos: depósito en la región extratorácica ***ET***) y Clase ***SR-0*** (insolubles y no reactivos: depósito despreciable). Esta clasificación para vapores y gases será simplificada en futuros documentos ***OIR*** de ***ICRP***.

Documentos OIR de ICRP

Los futuros documentos de ***ICRP*** (***Occupational Intakes of Radionuclides***, ***OIR***) de los que ya se han publicado borradores, incluirán una revisión de los coeficientes de dosis para trabajadores por inhalación e ingestión que sustituirán a los de las ***Publicaciones 30*** y ***68*** de ***ICRP***. Proporcionarán datos para la interpretación de las medidas de bioensayo en términos de dosis equivalente y/o efectiva comprometida reemplazando a las ***Publicaciones 54*** y ***78*** de ***ICRP***.

Dosis Absorbida (ver también dosis absorbida promedio)

La dosis absorbida ***D*** es la magnitud física definida por:

$$\boldsymbol{D = \frac{d\bar{e}}{dm}}$$

En donde $\boldsymbol{d\bar{e}}$ es la energía media cedida por la radiación ionizante a la materia en un volumen elemental ***dm***, siendo ***dm*** la masa de ese volumen elemental. La unidad en el sistema internacional (***SI***) de la dosis absorbida es el ***Gray*** (***Gy***), 1Gy = 1 julio por kilogramo (Jkg^{-1}).

Dosis Absorbida Promedio D_T

La dosis absorbida promedio en un órgano o tejido ***T*** está dado por:

$$\boldsymbol{D_T = \frac{1}{m_T} \int D.dm}$$

En donde $\boldsymbol{m_T}$ es la masa del órgano o tejido ***T*** y ***D*** es la dosis absorbida en un elemento ***dm*** de masa. La unidad en el sistema SI de la dosis absorbida promedio es el julio por kilogramo ($\boldsymbol{J\ kg^{-1}}$) y su nombre especial es el ***Gray*** (***Gy***).

Dosis Efectiva (E)

La ***Publicación 103*** de ***ICRP*** define la dosis efectiva a efectos de la protección radiológica como una magnitud ***E*** promediada para ambos sexos dada por la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{E = \sum_T w_T \left[\frac{H_T^H + H_T^M}{2}\right]}$$

En la que $\boldsymbol{H_T^H}$ y $\boldsymbol{H_T^M}$ son respectivamente las dosis equivalentes a los órganos y tejidos ***T*** del ***Adulto Varón de Referencia*** y de la ***Mujer Adulta de Referencia*** y $\boldsymbol{w_T}$ es el factor de ponderación tisular para el tejido ***T***, con $\boldsymbol{\sum_T w_T = 1.}$

La suma se lleva a cabo sobre todos los órganos y tejidos del cuerpo humano que se considera que tienen una cierta sensibilidad para el desarrollo o aparición de efectos estocásticos radioinducidos. Puesto que $\boldsymbol{w_T}$ no tiene dimensiones, la unidad en el sistema internacional (***SI***) de la dosis efectiva es la misma que para la dosis absorbida, $\boldsymbol{J\ kg^{-1}}$ y recibe el nombre de ***Sievert*** (***Sv***).

Dosis Efectiva Comprometida [E(τ)] *(Ver también "Dosis Efectiva")*

La suma de los productos de las dosis equivalentes comprometidas en órganos y tejidos por los correspondientes factores de ponderación tisulares ($\boldsymbol{w_T}$), en donde $\boldsymbol{\tau}$ es el tiempo de integración en años tras la incorporación. El tiempo $\boldsymbol{\tau}$ de integración es de ***50 años*** para trabajadores. De acuerdo con la ***Publicación 103*** de ***ICRP "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP", Annals of the ICRP. 37 (2-4). (2008)***, E(50) se calcula promediando las dosis equivalentes comprometidas para hombres (***H***) y mujeres (***M***) según la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{E(50) = \sum_T w_T \left[\frac{H_T^H(50) + H_T^M(50)}{2}\right]}$$

La unidad en el sistema internacional (***SI***) de la dosis efectiva comprometida es el Julio por kilogramo (J kg^{-1}) con el nombre especial de ***Sievert*** (***Sv***).

Dosis Equivalente (H_T)

La dosis equivalente $\boldsymbol{H_{TR}}$ en un órgano o tejido ***T*** debida al tipo de radiación ***R*** está dada por:

$$\boldsymbol{H_{T,R} = w_R . D_{T,R}}$$

En donde $\boldsymbol{D_{T,R}}$ es la dosis absorbida media en el tejido ***T*** debida a la radiación de tipo ***R*** en el ***Adulto Varón de Referencia*** (***Hombre Patrón***) o en la ***Mujer Adulta de Referencia*** (***Mujer Patrón***) y $\boldsymbol{w_R}$ es el factor de ponderación para la radiación de tipo ***R***. Puesto que $\boldsymbol{w_R}$ es adimensional, la unidad en el sistema internacional (***SI***) de la dosis equivalente es la misma que para la dosis absorbida, J kg^{-1} con el nombre especial de ***Sievert*** (***Sv***). La dosis equivalente total $\boldsymbol{H_T}$ es la suma de las $\boldsymbol{H_{T,R}}$ para todos los tipos ***R*** de radiación.

$$\boldsymbol{H_T = \sum_R w_R . D_{T,R}}$$

La dosis equivalente es una magnitud de protección radiológica**.**

Dosis Equivalente Comprometida [$H_T(\tau)$]

La integral en el tiempo de la tasa de dosis equivalente en un órgano o tejido del cuerpo que será recibida por la ***Persona de Referencia*** o ***Persona Patrón*** tras una incorporación de material radiactivo en su organismo siendo τ el tiempo de integración en años posterior a la incorporación. El tiempo τ de integración es de ***50 años*** para trabajadores.

Eficacia Biológica Relativa (RBE)

Cociente entre la dosis de una radiación de referencia de baja ***LET*** (Transferencia Lineal de Energía) y la dosis de una radiación en consideración que ocasiona el mismo efecto biológico. Los valores ***RBE*** varían con la dosis, la tasa de dosis y el efecto biológico final de que se trate. En protección radiológica son de especial interés los RBE para efectos estocásticos a bajas dosis (RBE_M).

Energía Efectiva Específica (SEE)

La energía efectiva específica (del inglés *Specific Effective Energy*), ***SEE (T←S)*** es la dosis equivalente recibida en un ***órgano blanco T*** por cada transformación nuclear de un radionucleido específico depositado en el ***órgano fuente S***. Su unidad es el Sv por transformación nuclear = Sv $(Bq\ s)^{-1}$. En los próximos documentos OIR de ICRP, la SEE estará denominada como ***Coeficiente-S*** (ponderado por la radiación) y en consecuencia estará definido para el Varon Adulto de Referencia y para la Mujer Adulta de Referencia.

Exposición

El estado o condición de estar sometido a una irradiación.

Exposición Ocupacional

Exposición a la radiación incurrida en el trabajo como consecuencia de situaciones que razonablemente pueden considerarse bajo responsabilidad del titular de la operación.

Factor de Dispersión (SF)

El factor de dispersión (***SF scattering factor***) es una medida de la incertidumbre de una medida de vigilancia individual de la exposición interna. Se asume que la incertidumbre total o global de una medida de vigilancia de la exposición interna puede describirse por medio de una distribución logarítmico-normal cuya desviación geométrica estándar se corresponde con el factor de dispersión (***SF***). En la guía, el factor de dispersión se divide en dos principales categorías denominadas incertidumbres de ***Tipo A*** y de ***Tipo B***. Las incertidumbres de ***Tipo A*** provienen únicamente de la estadística de contaje mientras que las de ***Tipo B*** del resto de fuentes de error o incertidumbre.

Factor de Ponderación de la Radiación w_R

Factor adimensional por el que se multiplica la dosis absorbida en un órgano tejido debida a la radiación de ***tipo R*** para reflejar la eficacia biológica relativa de esa radiación en la inducción de efectos estocásticos a bajas dosis. Se utiliza para determinar la dosis equivalente en un órgano o tejido a partir del promedio de la dosis absorbida en ese órgano o tejido. Los valores escogidos por ***ICRP*** para w_R solo lo están a efectos de la protección radiológica.

Factor de Ponderación Tisular o del Tejido w_T. (Ver también Dosis Efectiva)

Factor por el que hay que ponderar la dosis equivalente en un órgano o tejido para que represente la contribución relativa de ese órgano o tejido al detrimento general por efectos estocásticos resultante de la irradiación uniforme de todo el cuerpo. Está definido de forma que

$$\sum_T w_T = 1$$

Fracción Absorbida en el Tracto Gastrointestinal (f_1)

El valor f_1, que se utiliza en el modelo del tracto gastrointestinal de la ***Publicación 30*** de ***ICRP,*** indica la fracción de un elemento que desde el tracto gastrointestinal (desde el intestino delgado) es absorbido directamente por los fluidos corporales.

Función de Retención o de Excreción (función biocinética o de referencia de la técnica de bioensayo)

Función matemática que describe la variación temporal de la actividad retenida en el cuerpo (***función de retención***) o la actividad excretada en orina o heces (***función de excreción***) tras una única incorporación en ***t=0***. En general la función de retención ***m(t)*** predice el valor de la actividad en un órgano o en todo el cuerpo para un tiempo ***t*** después de la incorporación, mientras que la función de excreción ***m(t)*** representa la integral de la tasa de excreción para un tiempo ***t*** después de la incorporación. El decaimiento radiactivo en la muestra durante su periodo de recogida está tenido en cuenta. La ***Publicación 78*** de ***ICRP*** tabula estas funciones de retención y de excreción.

Hombre de Referencia y Mujer de Referencia (Individuo de Referencia)

Un hombre o mujer idealizada con características anatómicas y fisiológicas definidas por la ***Publicación 103*** de ***ICRP*** a efectos de la protección radiológica. Las características anatómicas y fisiológicas están definidas en el informe del Grupo de Trabajo de ICRP sobre el Hombre de Referencia en la ***Publicación 89*** de ***ICRP*** (*ICRP 2002**)***

Incorporación

Proceso por el cual los materiales radiactivos entran en el cuerpo humano. Las principales vías de entrada son la inhalación, la ingestión o a través de la piel intacta o de una herida. Según el modelo ***HRTM*** para el caso de inhalación de aerosoles, la actividad incorporada es mayor que la que se deposita en el cuerpo.

Incorporación única

Incorporación que tiene lugar en un tiempo suficientemente corto como para poder ser considerado instantáneo a los efectos de evaluar la dosis comprometida resultante.

Incorporación crónica

Incorporación que tiene lugar sobre un periodo prolongado de tiempo de tal forma que no puede ser considerada como instantánea a los efectos de evaluar la dosis comprometida resultante.

Magnitud Crítica de Vigilancia (M_c)

Si la magnitud ***M*** obtenida de un programa rutinario de vigilancia es menor que M_c, entonces se podrá considerar que las incorporaciones potenciales que hayan tenido lugar en un año calendario darán lugar a una dosis anual menor de ***0,1 mSv***. M_c es la cantidad de actividad retenida o excretada al final de un periodo de vigilancia derivada de una incorporación que si se repitiera en todos los periodos de vigilancia en los que se hubiera dividido un año natural, daría lugar a una dosis efectiva comprometida de ***0,1 mSv/año***. Si no se conoce el momento exacto de la incorporación, se supondrá que esta tuvo lugar en el punto medio del periodo o intervalo de vigilancia (***T/2***).

Maniquí Computacional (Voxel)

Maniquí computacional antropomórfico basado en imágenes médicas de tomografías en el que la anatomía se describe por pequeños elementos tridimensionales de volumen (***voxels***) especificando la densidad y la composición atómica de las distintas regiones y tejidos del cuerpo humano.

Medida Directa

Término genérico para cualquier clase de medidas ***in-vivo*** del material incorporado (contaje de cuerpo entero, de pulmón, de tiroides, etc.).

Medida Indirecta

Término genérico para cualquier clase de análisis ***in vitro*** del material excretado o eliminado por otros medios del cuerpo (por ejemplo, análisis de orina y heces). El término también se emplea para las medidas de muestreo de aire.

Modelo Biocinético

Modelo matemático que describe la incorporación, absorción y retención de un radionucleidos en los varios órganos y tejidos del cuerpo y su posterior excreción por diferentes vías.

Modelo Humano del Tracto Alimentario (HATM)

Modelo biocinético que describe el movimiento del material ingerido a través del tracto alimentario del ser humano y que viene descrito en la ***Publicación 100*** de ***ICRP*** (*ICRP 2006*). En este modelo se define el factor de transferencia del tracto alimentario f_A como la fracción de actividad que es absorbida en sangre desde el tracto alimentario, sin tener en cuenta las pérdidas debidas al decaimiento radiactivo o la entrada endógena (interna) de actividad al tracto alimentario.

Modelo del Tracto Respiratorio Humano (HRTM)

Modelo biocinético que describe el depósito, movimiento y absorción del material inhalado en el tracto respiratorio del ser humano y que viene descrito en la ***Publicación 66*** de ***ICRP*** (*ICRP 1994*). El modelo ***HRTM*** define las siguientes regiones:

- ***Vías Aéreas Extratorácicas*** (***ET***)

  La región nasal anterior (ET_1)y los pasajes nasales posteriores, la boca, la faringe y la laringe (ET_2)

- ***Región Bronquial*** (***BB***)

  La tráquea, los bronquios principales (primera bifurcación de las vías respiratorias o generación 1ª del árbol pulmonar y bronquios (hasta la generación 8ª del árbol pulmonar)

- ***Región Bronquiolar*** (***bb***)

  Los bronquiolos y las terminaciones bronquiolares (aproximadamente desde la generación 9ª hasta la 15ª del árbol pulmonar)

- ***Región Alveolar-Intersticial*** (***AI***)

  Los bronquiolos respiratorios, los conductos y sacos alveolares con sus alveolos y el tejido conectivo intersticial (desde la generación 16ª hasta la última que suele ser la 18ª-20ª generación del árbol pulmonar)

Periodo Biológico

Tiempo requerido para que la cantidad de un material depositado en un órgano, tejido o región del cuerpo se reduzca a la mitad a causa de procesos biológicos.

Persona de Referencia

En la ***Publicación 103*** de I***CRP*** la persona de referencia está definida como una persona idealizada para la cual las dosis equivalentes a órganos y tejidos se calculan promediando las correspondientes dosis del ***Hombre de Referencia*** y de la ***Mujer de Referencia***. La dosis equivalente de la ***Persona de Referencia*** es la que se utiliza para el cálculo de la ***Dosis Efectiva.***

Proceso Estructurado de Evaluación de Dosis

El proceso estructurado de evaluación de dosis consiste en una serie de etapas o pasos basados en los principios de armonización, exactitud y proporcionalidad (el esfuerzo dedicado a la evaluación de dosis debe ser proporcional a la magnitud de esta dosis, cuanto menor sea la dosis, menor debe ser el esfuerzo empleado en cuantificarla; ver ***Apartados 7 al 11***).

Tasa de Excreción

En general, la tasa de excreción es la cantidad de actividad que es excretada por orina u heces durante 24 horas, corregida por el decaimiento del radionucleido al final del periodo de recogida de 24 horas.

Un caso especial es el ***HTO*** (agua tritiada) cuya tasa de excreción viene dada generalmente en términos de concentración de actividad en el material excretado.

Terapia de Desincorporación

Uso de agentes quelantes para acelerar la eliminación de un radionucleido del organismo con objeto de reducir la dosis de radiación a una persona internamente contaminada con radionucleidos de forma accidental.

Tipo de Absorción

Clasificación del material inhalado de acuerdo con su tasa o velocidad de absorción por los fluidos corporales desde el tracto respiratorio. Los tipos de absorción vienen definidos en la ***Publicación 66*** de ***ICRP*** del siguiente modo:

- ***Tipo F***: Materiales depositados que desde el tracto respiratorio son fácilmente absorbidos por los fluidos corporales; tasa rápida de absorción.
- ***Tipo M***: Materiales depositados que desde el tracto respiratorio tienen una tasa intermedia de absorción por los fluidos corporales; tasa moderada de absorción.
- ***Tipo S***: Materiales depositados que son relativamente insolubles en el tracto respiratorio; tasa lenta de absorción.
- ***Tipo V***: Materiales depositados para los que se asume, con fines dosimétricos, una absorción instantánea a los fluidos corporales desde el tracto respiratorio. Aplica únicamente a ciertos gases y vapores de absorción muy rápida.

Los valores por defecto de los parámetros de absorción para cada tipo de absorción que aparecen en la ***Publicación 66*** de ***ICRP*** serán revisados en los próximos documentos ***OIR*** de ***ICRP*** tras una revisión de los datos experimentales

Umbral de Decisión y Límite de Detección

- **Umbral de Decisión (UD)**

  Valor fijo de una magnitud que está siendo sometida a un proceso de medida para cuantificar un efecto físico cualquiera (por ejemplo la presencia de un radionucleido en una muestra), que cuando es superado por el resultado de la medida real indica que el efecto físico está presente (*ISO, 2010a, 2010b*). El umbral de decisión es el valor crítico de un test estadístico para decidir entre la hipótesis de que el efecto físico no está presente y su hipótesis alternativa de que sí está presente. Cuando este valor crítico es superado por el resultado de una medida actual habrá que concluir que la hipótesis se debe rechazar. El test estadístico se diseña de forma tal que la probabilidad de rechazar erróneamente la hipótesis (***Error de Tipo I)*** (*concluir que el radionucleido está presente cuando no lo está; solo existe el efecto del fondo)* es como mucho igual a un cierto valor α. El umbral de decisión es una magnitud "***a posteriori***" evaluada tras una medida en particular para decidir si el resultado de la mediad es relevante o significativo. El umbral de decisión tiene otras denominaciones como ***nivel crítico***, ***nivel de decisión*** o ***actividad mínima significativa***.

- **Límite de Detección (*LD*)**

  El valor verdadero más pequeño de una magnitud que está siendo sometida a un proceso de medida que asegura una probabilidad específica de ser detectada por el procedimiento de medida (*ISO, 2010ª, 2010b*). El ***LD*** es el valor más pequeño que está asociado con el test estadístico y la hipótesis en conformidad con el umbral de decisión de la siguiente manera: si realmente el valor verdadero es igual o excede el ***LD***, la probabilidad de no rechazar erróneamente la hipótesis (***Error de Tipo II***) (*concluir que el radionucleido no está presenta cuando sí lo está*) es como mucho igual a un valor dado β. El ***LD*** es una magnitud "***a priori***" para un método particular de medida, evaluada con antelación al resultado de la medida. El límite de detección tiene otras denominaciones como ***actividad mínima detectable*** (***AMD***) o ***límite inferior de detección*** (***LID***).

Resumen

Las dosis producidas por la incorporación de radionucleidos no pueden ser medidas directamente, pero pueden ser estimadas a partir de resultados de vigilancias dosimétricas individuales, ya sea a partir de medidas de cuerpo entero, orina o heces. Estas estimaciones requieren la aplicación de modelos dosimétricos y biocinéticos, y la persona que realice la estimación tendrá que establecer una serie de supuestos acerca de factores tales como la vía de incorporación y las propiedades del material incorporado.

Ejercicios de Intercomparación como el de *Doerfel* en el año 2000 hicieron patente que a partir de unos mismos datos iniciales se podían realizar estimaciones de dosis que variaban en un amplio rango como resultado de los diferentes supuestos que podrían realizarse sobre tales factores. A la vista de estos resultados quedó patente la necesidad de elaborar una guía para la armonización de los criterios a utilizar en los procesos de estimación de dosis. Como resultado de esta necesidad, se estableció un proyecto en el 5º programa marco de la Comisión Europea (CE) con el objetivo de que sirviera de guía para la estimación de dosis interna a partir de datos de vigilancias dosimétricas (Proyecto ***IDEAS***, del inglés ***Internal Dose Assesments from Monitoring Data***).

En el año 2006, se publicó la primera versión de la ***Guía IDEAS***, que ofrecía asesoramiento para el proceso de estimación de dosis. Siguiendo esta publicación se creó un grupo de trabajo conjunto entre la red europea ***CONRAD*** y ***EURADOS***, para mejorar y actualizar la ***Guía IDEAS*** y para incorporar recientes desarrollos en el campo de la dosimetría interna. El presente documento es fruto de aquel trabajo.

La ***Guía IDEAS*** está basada en la filosofía general de:

- Armonización: Mediante el seguimiento de esta guía, dos personas que realicen una estimación de dosis deben llegar a los mismos resultados partiendo de datos idénticos.
- Precisión: Con los datos disponibles se deberá obtener la "mejor" estimación de dosis..
- Proporcionalidad: La complejidad del cálculo de la estimación de dosis deberá ser proporcional a la magnitud de la dosis -Cuanto menor sea la dosis, más simple deberá ser el proceso-

Siguiendo estos principios, la guía emplea los siguientes "***Niveles de tareas***" para estructurar el proceso de una evaluación de dosis:

- ***Nivel 0***: ***Dosis anual < 0,1mSv***. No se requiere estimación de dosis.
- ***Nivel 1***: ***0,1 mSv ≤ Dosis anual < 1 mSv***. Evaluación simple, empleando parámetros de referencia de ***ICRP***.
- ***Nivel 2***: ***1 mSv ≤ Dosis anual < 6 mSv***. Evaluación más específica, empleando para ello información adicional para llevar a cabo una estimación más realista.
- ***Nivel 3***: ***Dosis anual ≥ 6 mSv***. Evaluaciones más sofisticadas, empleando para ello información más completa.

En esta nueva versión se han realizado las siguientes modificaciones:

- Información adicional y revisión de la literatura existente acerca de los valores de excreción de U, Th, Ra, Po en diferentes muestras de bioensayo (orina y heces) y localizaciones debidos a la ingesta de alimentos.
- Recopilación de valores típicos de límites de detección alcanzables para diferentes técnicas de bioensayo
- Nuevas incertidumbres por defecto de las medidas (p.e. Valores de dispersión "scattering factor", ***SF***) para distintos tipos de datos obtenidos de las vigilancias.
- Información adicional acerca del número mínimo y tipo de medidas requeridas para la estimación de dosis.
- Información adicional para el cálculo del ***AMAD*** efectivo
- Información adicional para el ajuste de datos y pruebas estadísticas de autocorrelación.
- Introducción de un procedimiento especial para casos de incorporación de radionucleidos a través de heridas, siguiendo el modelo para heridas de ***NRCP 156***.
- Introducción de la descripción de un método de estimación directa para el tritio.
- Ejemplos de evaluaciones mostrando la correcta aplicación de la guía tomados del curso avanzado de entrenamiento para la estimación de dosis internas de ***EURADOS*** y el ***OIEA***.
- Composiciones isotópicas típicas de ***U*** y ***Pu*** encontradas en la industria nuclear.

Esta versión tiene en cuenta las futuras publicaciones de la ***OIR*** de ***ICRP***, por lo que la ***Guía*** se podrá seguir utilizando cuando se publiquen. También se incluye una breve descripción de la norma ***ISO 27048 "Dose assesment for monitoring of workers for internal radiation exposure"***, y se compara esta norma con lo recogido por la ***Guía IDEAS***.

1. Introducción

1.1 El proyecto IDEAS

1.1.1 Introducción

La necesidad de armonización de los procedimientos de estimación de dosis ha sido el objetivo del proyecto ***IDEAS***, parcialmente financiado por la ***Comisión Europea*** bajo el contrato No. FIKR-CT2001-00160.

El proyecto ***IDEAS*** comenzó en octubre de 2001 y terminó en junio de 2005, estando implicadas en su desarrollo las siguientes instituciones: Forschungszetrum Karlsruhe (*FZK*), Germany; Belgian Nuclear Research Centre (*SCK.CEN*), Bélgica); Electricité de France (*EDF*), Francia; Italian National Agency for New Technology, Energy and the enviroment (*ENEA*), Italia; Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), Francia; KFKI Atomic Energy Research Institute (*AEKI*), Hungría; Radiation Protection Institute (*RPI*), Ucrania; National Radiological Protection Board (*NRPB*), ahora Health Protection Agency, Radiation Protection Division, (*HPA-RPD*), Reino Unido.

El proyecto ***IDEAS*** se dividió en paquetes de trabajo (Work Packages, WP), uno por cada una de las 5 principales tareas:

WP1 ***Recopilación de casos de incorporaciones descritos en la bibliografía***.

Se realizaron dos bases de datos, la "*IDEAS Bibliography Database*" y la "*IDEAS Internal Contamination Database*" (*Hurtgen 2007*); http://www.sckcen.be/ideas/). La "*IDEAS Bibliography Database*" recopila información presente tanto en la literatura general como en otras publicaciones relacionadas directamente con casos de contaminación interna. La "*IDEAS Internal Contamination Database*" se llevó a cabo para recopilar las descripciones de casos seleccionados y bien documentados en un formato específico que contuviera toda la información requerida para la estimación de la dosis interna.

WP2 ***Preparación del software de evaluación***.

El actual código *IMIE (Individual Monitoring of the Internal Exposure, Berkovski 2000, Berkovski 2002)*, se usó como plataforma para analizar los métodos y enfoques dde datos de bioensayo ya existentes asi como los desarrolladosen el marco del proyecto. *IMIE* permite al usuario revisar y comparar simultáneamente diferentes combinaciones posibles de condiciones de exposición así como seleccionar el grado de automatización desde completamente automático hasta completamente manual.

WP3 Evaluación de casos de incorporación.

Se evaluaron 52 casos seleccionados empleando el código ***IMIE*** y el código ***IMBA*** (***Integrated Modules for Bioassay Analysis***, (*Birchall 2003*). Como consecuencia de este proceso se identificaron diversos aspectos generales que convendría orientar mediante una guía y en consecuencia se definieron los aspectos generales de la evaluación de datos procedentes de la vigilancia individual de la exposición interna. (*Castellani 2004*).

WP4 Desarrollo de la guía.

Los integrantes del grupo desarrollaron una estrategia común para abordar la evaluación de los datos procedentes de las vigilancias, se elaboró un borrador con las líneas generales de actuación, sometiéndolo a discusión con expertos en dosimetría interna a través de un taller online realizado a principios del 2004 que sirvió para mejorar la estrategia común y las líneas generales.

WP5 Pruebas prácticas.

La validez del borrador de guía elaborado se sometió a prueba a través de un ejercicio de intercomparación conjunto entre ***IDEAS*** y el ***OIEA*** abierto a participantes de todo el mundo. Algunos de los 76 participantes dieron respuesta a todos los casos. Otros respondieron solo algunos de los 6 casos propuestos para la evaluación. Los resultados se discutieron con los participantes en un simposio celebrado en abril del 2005 y han sido evaluados y desarrollados en una publicación (*Hurtgen 2005)*. Tras estas etapas, la ***Guía IDEAS*** se dio por finalizada.

1.1.2 El ejercicio de Intercomparación IDEAS/OIEA

El ejercicio de intercomparación comenzó con su anuncio a principios de agosto del 2004. La selección de los casos se prolongó hasta septiembre del 2004. Los casos se pusieron en la página web de ***IDEAS*** a principios de octubre del 2004.

Estos casos estuvieron disponibles para su evaluación hasta finales de enero de 2005, por lo que se dispuso de 4 meses para llevar a cabo la evaluación y adjuntar los resultados de la misma. El análisis de los resultados se realizó durante los meses de febrero y marzo de 2005, el simposio final tuvo lugar en el ***OIEA*** en abril del 2005.

La tabla 1.1 resume los resultados obtenidos para los radionucleidos considerados en los seis casos en términos de dosis efectivas comprometidas, ***E(50)*** (con la media geométrica y desviación estándar geométrica calculadas una vez descartados los datos espurios). Estos datos espurios se identificaron como tales en base a un procedimiento estadístico empleado previamente en otro ejercicio *(Doerfel 2000*). El número de participantes y de datos fuera de rango por cada caso en estudio también figuran en la tabla.

Tabla 1.1 Evaluación estadística de los resultados de dosis efectiva comprometida E(50) de la Intercomparación IDEAS/OIEA (excluyendo datos fuera de rango)

Nº de caso	Radionucleido	Media geométrica E(50) (mSv)	Desviación estándar E(50) (mSv)	Nº de resultados[(a)]
1	H-3	25,8	1,06	46 (12)
2	Cs-137	0,66	1,16	52 (6)
	Sr-90	7,22	1,94	48 (10)
3	Co-60	5,0	1,4	56 (6)
4	I-131	2,57	1,07	50 (13)
5	U enriquecido	36,8	2,4	38 (3)
6	Am-241	52	2,1	32 (3)
	Pu-239	140	1,58	31 (5)

[(a)] El número de datos fuera de rango figura entre paréntesis

Los resultados del ejercicio fueron sometidos a discusión con los participantes durante un simposio organizado por el ***OIEA*** en abril del año 2005. De los 76 participantes que realizaron al menos una estimación, el 36% respondió a la totalidad de los casos. Los casos con mayor participación fueron los del Co-60 e I-131 (84%), mientras que el de menor participación fue (57%) la parte del Am-241 del ejercicio 6.

Aunque no fue posible hacer una comparación directa en cuanto a dispersión de resultados entre el tercer ejercicio europeo de intercomparación (*Doerfel 2000*) y el ejercicio de intercomparación ***IDEAS/OIEA*** (*Hurtgen 2005*), la aplicación de este primer borrador de la guía ya parece producir una disminución en la dispersión de resultados, ya que la desviación geométrica estándar tiende a ser menor. En torno al 20% de los participantes emplearon la guía correctamente y alcanzaron resultados que pueden ser considerados como completamente exactos.

Otra importante conclusión extraída de este ejercicio de intercomparación fue la baja incidencia de datos fuera de rango entre aquellos que aplicaron la guía respecto a los que no lo hicieron, por lo que se puede concluir que esta guía tiene una influencia positiva en la armonización de las dosis e incorporaciones reportadas.

No obstante, incluso una guía muy detallada no puede servir de gran ayuda si se emplean suposiciones poco realistas o se cometen errores triviales, por ello, como punto final a la intercomparación, los autores indicaron la necesidad de hacer un mayor esfuerzo para la promoción y correcta aplicación de esta guía en la comunidad de expertos en dosimetría interna junto con un entrenamiento específico.

1.1.3 La Guía IDEAS 2006

La ***Guía IDEAS***, actualizada de acuerdo a las conclusiones y experiencias del ejercicio de Intercomparación se publicó como informe FZKA en 2006 (*Doerfel* 2006).

La filosofía general de la guía se centra en los siguientes principios:

- ***Armonización***: Cualquier evaluador de dosis debería obtener la misma estimación para un mismo conjunto de datos.
- ***Exactitud***: Se debe obtener la "mejor" estimación a partir de la información disponible.
- ***Proporcionalidad***: El esfuerzo aplicado a la evaluación de dosis debe ser proporcional a la magnitud de la misma.

Se proponen unos niveles de tareas para abordar el proceso de estimación de la dosis interna, así como procedimientos especiales según las diferentes vías de incorporación.

La publicación de ***IDEAS*** del 2006 describe los modelos biocinéticos de ***ICRP*** (*ICRP 1998*) y asesora acerca del manejo de la información relativa a las medidas de bioensayo para el cálculo de dosis. También se propone una forma de cuantificar las incertidumbres de las medidas mediante el empleo de ***factores de dispersión SF*** (*Scattering Factors*) y herramientas estadísticas para juzgar el ajuste de los datos a los modelos y la cuantificación de la mejor estimación de la incorporación.

El procedimiento estándar para la evaluación de la dosis efectiva comprometida está estructurado a través de diagramas de flujo a lo largo de cuatro etapas de complejidad creciente dependiendo de la magnitud de la dosis que se espera obtener.

- En el ***nivel 0***, cuando la actividad medida es menor que un cierto valor umbral determinado a priori en función del modelo biocinético, el periodo de vigilancia y la técnica de medida, la dosis anual asociada a dicha actividad es muy probablemente inferior a ***0,1 mSv***, no requiriéndose ninguna evaluación dosimétrica adicional.
- En el ***nivel 1***, para una dosis entre ***0,1*** y ***1 mSv***, se lleva a cabo una evaluación sencilla utilizando los parámetros de referencia de ***ICRP*** a no ser que se disponga de información específica: incorporación por inhalación de aerosoles polidispersos con ***AMAD*** de ***1*** o ***5*** micras, tipos de absorción ***F***, ***M*** o ***S***, y momento de la incorporación en el punto medio del intervalo de vigilancia.
- En el ***nivel 2***, si la dosis estimada puede superar ***1 mSv*** o si se trata de un incidente, se recomienda realizar varias medidas empleando diferentes técnicas y/o a diferentes tiempos. La mejor estimación de la incorporación, el AMAD y el tipo de absorción del radionucleido se obtendrán ajustando las predicciones del modelo a los datos de las medidas.
- En el ***nivel 3***, si la estimación de dosis es superior a ***6 mSv***, se debe realizar una evaluación más sofisticada, ajustando los parámetros del modelo en un orden establecido hasta que se alcance un nivel de consistencia adecuado entre la predicción del modelo y la información obtenida de las medidas.

1.2 Documentación reciente de referencia para la evaluación de la exposición interna

1.2.1 Las Recomendaciones de ICRP del año 2007 – Dosis Efectiva

La ***Publicación 103*** de ***ICRP*** (*ICRP 2008*) de las nuevas recomendaciones de 2007, introduce importantes cambios en la definición de la ***dosis efectiva*** que está conduciendo a un proceso de revisión de los modelos biocinéticos y de los coeficientes de dosis.

Las magnitudes de protección se utilizan para especificar límites de dosis que aseguren que la aparición de efectos estocásticos se mantendrá por debajo de niveles inaceptables y que las reacciones tisulares no aparecerán (efectos deterministas).

La definición de las magnitudes de protección se basan en el promedio de la dosis absorbida $D_{T,R}$ en el volumen de un determinado órgano o tejido ***T*** debida a la radiación de tipo ***R***. La radiación ***R*** está a su vez definida por el tipo y energía de la radiación incidente en el cuerpo o emitida por los radionucleidos residentes en él. Se utilizan representaciones ***Computacionales*** del ***Hombre*** y de la ***Mujer de Referencia*** para determinar el promedio de la dosis absorbida D_T en un órgano o tejido ***T*** procedente de las transformaciones nucleares de los radionucleidos tras una incorporación. Estas dosis absorbidas a órganos y tejidos se multiplican después por el factor de ponderación de la radiación w_R (**Tabla 1.2**) para determinar las dosis equivalentes en los órganos y tejidos del ***Hombre*** y de la ***Mujer de Referencia***.

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

La suma se lleva a cabo sobre todos los tipos de radiación involucrados. La unidad de la dosis equivalente es el $J\ kg^{-1}$ con el nombre especial de ***Sievert*** (***Sv***).

Tabla 1.2 Valores de Referencia para el Factor de Ponderación de la Radiación w_R (*ICRP, 2008*)

Tipos de Radiación	Factor de Ponderación de la radiación w_R
Fotones	1
Electrones y Muones	1
Protones y Piones con carga	2
Partículas α, Fragmentos de fisión e Iones pesados	20
Neutrones	$2{,}5 + 18{,}2\ e^{-\frac{[Ln(E_n)]^2}{6}}$ para $E_n < 1$ MeV
	$5{,}0 + 17{,}0\ e^{-\frac{[Ln(2E_n)]^2}{6}}$ para 1 MeV ≤ E_n ≤ 50 MeV
	$2{,}5 + 3{,}25\ e^{-\frac{[Ln(0{,}04E_n)]^2}{6}}$ para $E_n > 50$ MeV

Las dosis equivalentes en órganos y tejidos del ***Hombre*** y de la ***Mujer de Referencia*** son valores promedios. Esta dosis equivalente promedio se multiplica por su correspondiente factor de ponderación del tejido (***Tabla 1.3***) para obtener la dosis efectiva promediada por género para la ***Persona de Referencia***, que no es

más que la suma de todos esos productos. La ***Dosis Efectiva E*** se calcula entonces a partir de las dosis equivalentes determinadas en los órganos o tejidos ***T*** del ***Hombre de Referencia*** H^H_T y de la ***Mujer de Referencia*** H^M_T conforme a la siguiente formulación:

$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H^H_T + H^M_T}{2}\right]$$

Los factores de ponderación del tejido de la ***Tabla 1.3*** son valores promedios para ambos géneros y todas las edades para todos los órganos y tejidos, incluyendo el pecho masculino y femenino así como los testículos y ovarios (gónadas para los efectos hereditarios y carcinogénicos). Este promedio implica que la aplicación de la fórmula anterior está restringida únicamente para la determinación de la dosis efectiva a efectos de la protección radiológica y en particular no se puede utilizar para la determinación de riesgos individuales.

De forma análoga a como se ha promediado para los órganos y tejidos ***T***, la dosis equivalente de los órganos que conforman el ***Resto*** se define de forma diferente para el ***Hombre de Referencia*** y ***Mujer de Referencia***. La dosis equivalente para los órganos que conforman el ***Resto*** se calcula ahora como la media aritmética de las dosis equivalentes de los tejidos que aparecen en la nota del final de la ***Tabla 1.3.*** La dosis equivalente para el resto de órganos del ***Hombre de Referencia*** H^H_{resto} y de la ***Mujer de Referencia*** H^M_{resto} se calcula conforme a la siguiente formulación:

$$H^H_{resto} = \frac{1}{13}\sum_T^{13} H^H_T \; y \; H^M_{resto} = \frac{1}{13}\sum_T^{13} H^M_T$$

Tabla 1.3 Valores de Referencia para el Factor de Ponderación del Tejido (*ICRP, 2008*)

Tejido	**Factor de Ponderación del tejido w_T**
Médula Roja Ósea, Colon, Pulmones, Estómago, Mama, Resto del Organismo [a]	0,12
Gónadas	0,08
Vejiga, Esófago, Hígado y Tiroides	0,04
Superficie de los Huesos, Cerebro, Glándulas Salivares y Piel	0,01
[a] Glándulas Suprarrenales, Región Extratorácica, Vesícula Biliar, Corazón, Riñones, Intestino Delgado, Nódulos Linfáticos, Músculos, Mucosa Oral, Páncreas, Próstata (masculino), Bazo, Timo, Útero (femenino)	

Las magnitudes de ***Dosis Equivalente*** y ***Dosis Efectiva*** no son medibles en la práctica. Para el cálculo de los coeficientes de dosis tras una incorporación de radionucleidos se utilizan modelos biocinéticos para los distintos radionucleidos, datos fisiológicos de referencia y maniquíes computacionales.

La ***Publicación 103*** de ***ICRP*** (*ICRP 2008*) reconoce que puede haber circunstancias en las que para el cálculo de la dosis efectiva pudiera ser necesario cambiar los valores de referencia de algunos parámetros específicos relacionados con las propiedades del material incorporado, tales como los parámetros de absorción, los factores de asimilación gastrointestinal y los parámetros asociados con los aerosoles. Sin embargo, puesto que la dosis efectiva está definida para la ***Persona de Referencia***, los valores de aquellos

parámetros específicos relacionados con la persona en particular no deberán ser modificados. Ejemplos de parámetros específicos relacionados con un individuo que no se deben modificar son las variables o parámetros de transporte del modelo ***HRTM***, los parámetros de tránsito del modelo ***HATM*** y las constantes de los modelos biocinéticos.

En las últimas etapas de esta guía, que se aplican en aquellos casos en los que se dispone de abundantes datos de gran calidad, puede ser necesario modificar los valores de algunos de los anteriores parámetros que ***ICRP*** dice que no se deben modificar, para hacerlos específicos con el individuo en cuestión con el fin de obtener un ajuste adecuado entre los datos obtenidos de las medidas de bioensayo y las predicciones de los modelos biocinéticos, es decir ajustar las variables del modelo a las características particulares del individuo en particular. Sin embargo estos cambios están limitados a aquellos casos en los que la dosis estimada es elevada y en los que se hace necesario evaluar los riesgos individuales. Hay que hacer notar también que los casos en los que pueda ser necesario realizar evaluaciones individuales del riesgo serán en general una excepción y requerirán la participación de expertos dosimetristas para su realización.

Hay que recalcar que la dosis efectiva es una magnitud de protección radiológica y ni ella ni la dosis equivalente a órganos y tejidos puede ser utilizada en evaluaciones individuales de riesgo o en estudios epidemiológicos. En estos casos habrá que utilizar la dosis absorbida con los valores más apropiados de los factores de riesgo y variables biocinéticas o de efectividad biológica (*ICRP, 2007*).

Desde la publicación por ICRP de los coeficientes de dosis y otros datos de referencia para la vigilancia de la exposición interna de trabajadores expuestos (*ICRP-1997*) ICRP está actualizando sus modelos que serán utilizados en el cálculo de nuevos valores de estas magnitudes de referencia. A continuación se recoge un breve resumen de los nuevos modelos biocinéticos de ICRP.

1.2.2 Modelo para el Tracto Alimentario del ser Humano (HATM)

En la ***Publicación 100*** de ***ICRP*** se desarrolla un nuevo ***Modelo del Tracto Alimentario del ser Humano*** (***HATM***) que depende de la edad y sexo de la persona en consideración. La estructura del modelo se puede observar en la siguiente ***Figura 1.1***, mientras que la ***Tabla 1.4*** presenta las tasas de transferencia para el movimiento del contenido del tracto alimentario en los diversos órganos que lo componen.

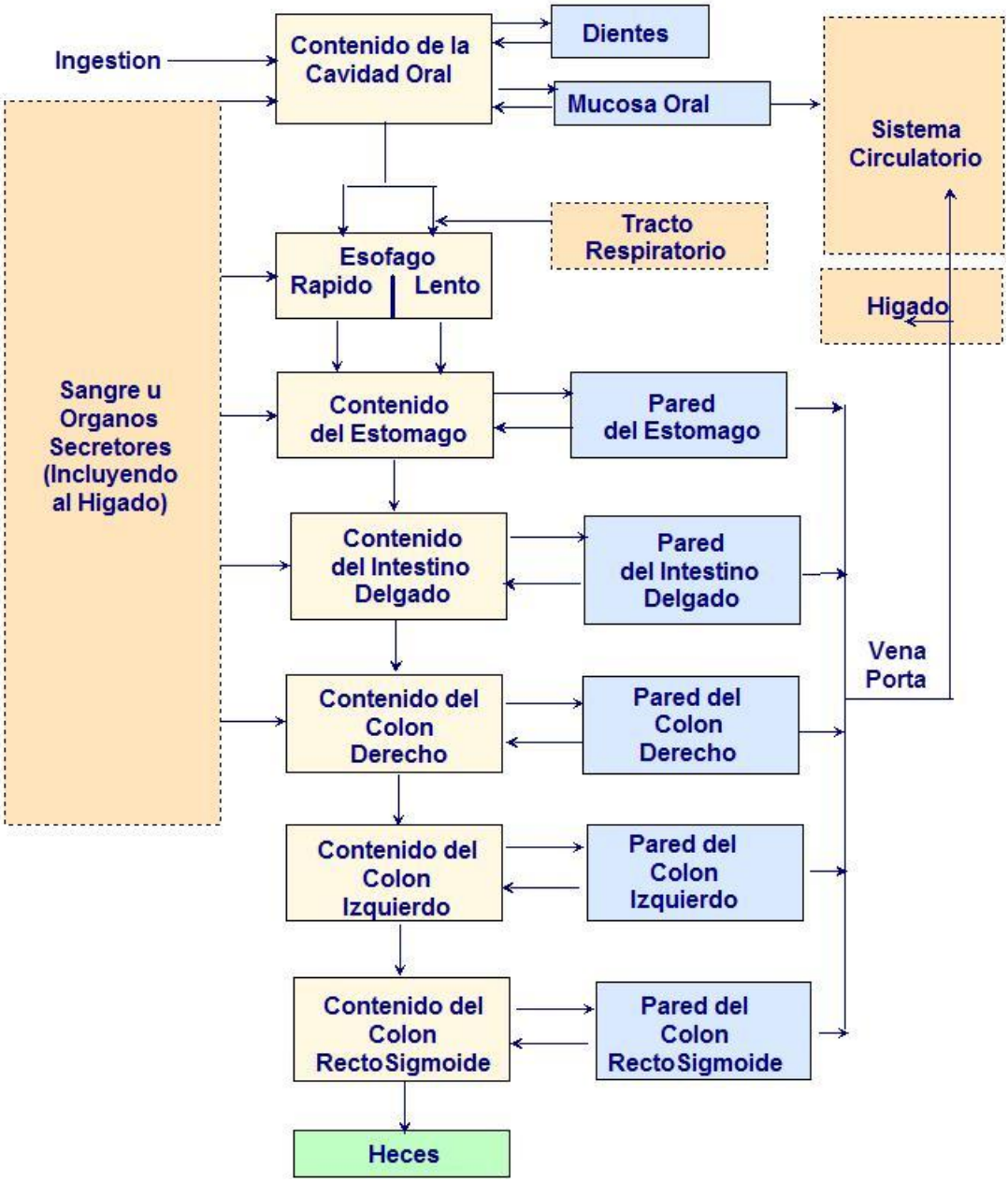


Figura 1.1 Estructura del nuevo modelo alimentario (HATM) de ICRP (ICRP-2006). Los compartimentos naranjas muestran las conexiones con otros modelos.

En comparación con el anterior modelo del ***Tracto Gastrointestinal*** de ***ICRP-30*** (*ICRP* 1979), los principales cambios biocinéticos provienen de la inclusión de nuevos compartimentos iniciales para la cavidad bucal y el esófago con tiempos de retención de solo algunos segundos y la posibilidad de absorción a sangre no solo directamente desde el intestino delgado sino desde casi todos los compartimentos del modelo con retención potencial en las paredes de los órganos y subsiguiente recirculación a los contenidos del tracto alimentario. La fracción total de absorción en el tracto alimentario se cuantifica por el parámetro f_A.

Tabla 1.4 Tasas de Transferencia en días^{-1} para el hombre y mujer de referencia para el movimiento del contenido del tracto alimentario HATM por sus distintos órganos (*ICRP 2006*)

Región	Hombre Adulto	Mujer Adulta
Boca		
Sólidos	5760	5760
Líquidos	43200	43200
Dieta Total	7200	7200
Esófago (rápido)		
Sólidos	10800	10800
Líquidos	17280	17280
Dieta Total	12343	12343
Esófago (lento)		
Sólidos	1920	1920
Líquidos	2880	2880
Dieta Total	2160	2160

Región	Hombre Adulto	Mujer Adulta
Estómago		
Sólidos	19,2	13,71
Líquidos calóricos	32	24
Líquidos no calóricos	48	48
Dieta Total	20,57	15,16
Intestino delgado	6	6
Colon derecho	2	1,5
Colon izquierdo	2	1,5
Colon rectosigmoide	2	1,5

1.2.3 Datos Físicos para el Cálculo de Dosis

La ***Publicación 107*** de ***ICRP*** (*ICRP 2008*) incorpora una base de datos electrónica de datos físicos específicos por radionucleido para poder efectuar los cálculos necesarios que haya que hacer a efectos de protección radiológica. Esta base de datos sustituye a la de la ***Publicación 38*** de ***ICRP*** (*ICRP 1983*).

La base de datos contiene información de los periodos, cadenas de decaimiento, rendimientos y energías de radiación emitidas por transformación nuclear de 1252 radionucleidos de 97 elementos. El ***CD*** que acompaña a la publicación, proporciona acceso electrónico a tablas completas con las radiaciones emitidas por los isótopos así como a los espectros beta y neutrónico. La base de datos está construida de forma tal que un usuario pueda extraer la información que necesite de un radionucleido en particular para hacer los cálculos que desee. Se incluye una aplicación bajo Windows para desplegar un resumen de la información disponible para cada radionucleido así como las características generales de los isótopos de la base de datos. También es posible exportar de la base de datos las emisiones de un radionucleido en particular para poder hacer otro tipo de cálculos con ellos.

1.2.4 Maniquíes Computacionales del Adulto de Referencia

La evaluación de las dosis equivalentes para el ***Hombre*** y ***Mujer de Referencia*** así como la dosis efectiva para la ***Persona de Referencia*** se basa en el uso de modelos (***maniquíes***) antropomórficos. En el pasado, ***ICRP*** no especificó un maniquí en particular y de hecho se utilizaron varios maniquíes matemáticos. Ahora ***ICRP*** utiliza maniquíes computacionales del ***Hombre*** y ***Mujer Adultos de Referencia*** para el cálculo de las dosis equivalentes en órganos y tejidos. La ***Publicación 110*** de ***ICRP*** (*ICRP 2009*) describe el desarrollo y el uso que se pretende dar a los maniquíes computacionales del ***Hombre y Mujer de Referencia***. Los maniquíes están basados en imágenes de personas reales y por tanto son consistentes con los parámetros

fisiológicos y anatómicos tanto de hombres como de mujeres indicados en la ***Publicación 89*** de ***ICRP*** (*ICRP 2002*). Los maniquíes de referencia se han construido tras modificar los modelos voxel (volumen pixel) de dos individuos cuyos pesos y alturas se asemejan a los de referencia. Las masas de los órganos de ambos modelos se ajustaron a los del ***Hombre*** y ***Mujer de Referencia*** sin comprometer su realismo anatómico. Los datos numéricos que representan los maniquíes están contenidos en un ***CD-ROM*** que viene con la publicación de ***ICRP*** antes indicada.

1.2.5 Modelo para Heridas de la NCRP

La ***NCRP*** (***United States National Council on Radiation Protection Measurements*** – *Consejo Nacional de los Estados Unidos sobe las Medidas de Protección Radiológica*) ha desarrollado y publicado (*NCRP 2006, Guilmette 2003*) un nuevo modelo biocinético para heridas que consta de ***5 compartimentos*** que describen como se libera la actividad desde la herida directamente a la sangre o a los nódulos linfáticos y desde allí también a la sangre.

El modelo de la ***NCRP*** define por defecto ***7 categorías de retención*** para la actividad de la herida en función del material radiactivo presente en la herida. Existen ***4 categorías*** para ***material soluble*** (con ***retención débil***, ***moderada***, ***fuerte*** y ***ávida*** para la actividad en la herida) y ***3 categorías*** para material en forma de ***coloides***, ***fragmentos*** y ***partículas***. Existen diferentes compartimentos de ***asimilación*** (***uptake***) para materiales solubles, coloides, partículas y fragmentos, y para cada una de las categorías por defecto solo se utilizan algunos de los ***5 compartimentos*** del modelo.

La estructura del modelo de heridas de la ***NCRP*** que se representa en la ***Figura 1.2*** siguiente está compuesta por ***5 compartimentos*** enlazados entre ellos por una cinética de primer orden (ecuaciones diferenciales lineales) al igual que en el resto de modelos biocinéticos de ***ICRP***. La denominación de los compartimentos es la siguiente:

- ***Soluble***
- ***Coloidal y Estado Intermedio*** (CIS en inglés)
- ***Agregados de Partículas y Estado Ligado*** (PABS en inglés)
- ***Partículas Atrapadas y Agregados*** (TPA en inglés)
- ***Fragmentos***

La estructura completa del modelo queda representada en la ***Figura 1.2***.

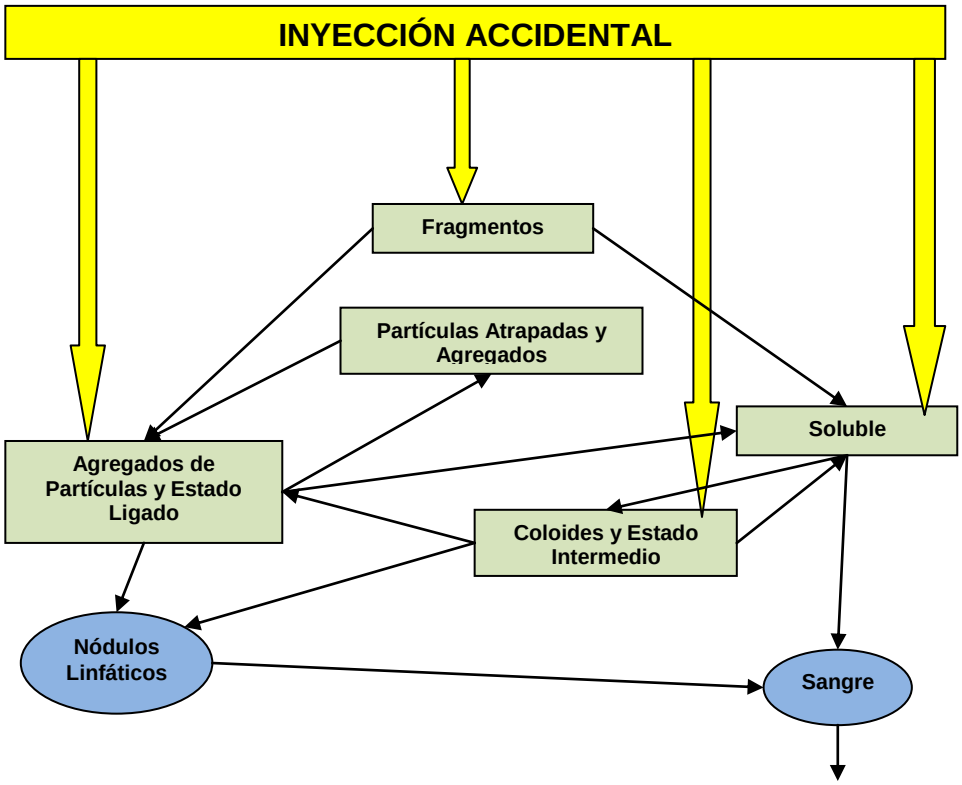


Figura 1.2 Estructura general del modelo de Heridas de la NCRP

Los compartimentos se han denominado de esta forma para describir un cierto estado físico o químico del radionucleido. La estructura general del modelo pretende describir de forma general tanto al material soluble como al insoluble. Para materiales solubles la principal vía de liberación de actividad desde la herida es a través de la sangre mientras que para partículas es a través de los nódulos linfáticos (***NL***). Una disolución posterior de las partículas en los nódulos linfáticos da lugar también a una transferencia de los radionucleidos a la sangre. La sangre es el compartimento que enlaza el modelo de heridas con el modelo sistémico del radionucleido de que se trate. El comportamiento del radionucleido una vez que alcanza la sangre es el mismo que si hubiera sido directamente inyectado en forma soluble en sangre.

El comportamiento de los materiales solubles en la herida está fuertemente influenciado por la química de las soluciones acuosas, en particular por la tendencia del radionucleidos a hidrolizarse. Esto afecta a su estado fisicoquímico así como a su tendencia como partícula cargada a ligarse localmente con las moléculas de los tejidos (*NCRP 2006*).

Para materiales insolubles, son otros los mecanismos que juegan el papel principal, principalmente la fagocitosis y el encapsulamiento en tejido fibroso. En consecuencia, el modelo de la ***NCRP*** ha desarrollado diferentes sub-modelos (categorías) dependiendo de las características físicas y químicas del material depositado en la herida (*NCRP 2006*).

La ***Tabla 1.5*** presenta los valores por defecto de las tasas de transferencia (***constantes de remoción***) para materiales solubles e insolubles.

Tabla 1.5 Tasas de transferencia por defecto del modelo de heridas de la NCRP. CIS, coloide y estado intermedio, PABS, agregados de partículas y estado ligado, nódulos linfáticos (NL) (Tabla 4.12 del NCRP-156)

Transferencia	Tasas de Transferencia en días^{-1}						
	Débil	Moderado	Fuerte	Ávido	Coloides	Partículas	Fragmentos
Soluble a Sangre	45	45	0,67	7,0	0,5	100	
Soluble a CIS	20	30	0,6	30	2,5	-	
CIS a Soluble	2,8	0,4	0,024	0,03	0,025	-	
CIS a PABS	0,25	0,065	0,01	10	0,05	-	
CIS a NL	$2x10^{-5}$	$2x10^{-5}$	$2x10^{-5}$	$2x10^{-5}$	$2x10^{-3}$	-	
PABS a Soluble	0,08	0,02	0,0012	0,005	0,0015	$2x10^{-4}$	-
PABS a NL	$2x10^{-5}$	$2x10^{-5}$	$2x10^{-5}$	$2x10^{-5}$	$4x10^{-4}$	$3,6x10^{-3}$	0,004
PABS a TPA	-	-	-	-	-	0,04	0,7
TPA a PABS	-	-	-	-	-	0,0036	0,0005
NL a sangre	-	-	-	-	0,03	$6x10^{-4}$	0,03
Fragmento a Soluble	-	-	-	-	-	-	-
Fragmento a PABS	-	-	-	-	-	-	0,008

Para compuestos solubles el comportamiento químico es el factor más importante. Para estas categorías solubles, el modelo general como se deduce de la ***Figura 1.2***, se reduce a tres compartimentos y no hay transferencia desde los nódulos linfáticos a la sangre (***Figura 1.3***)

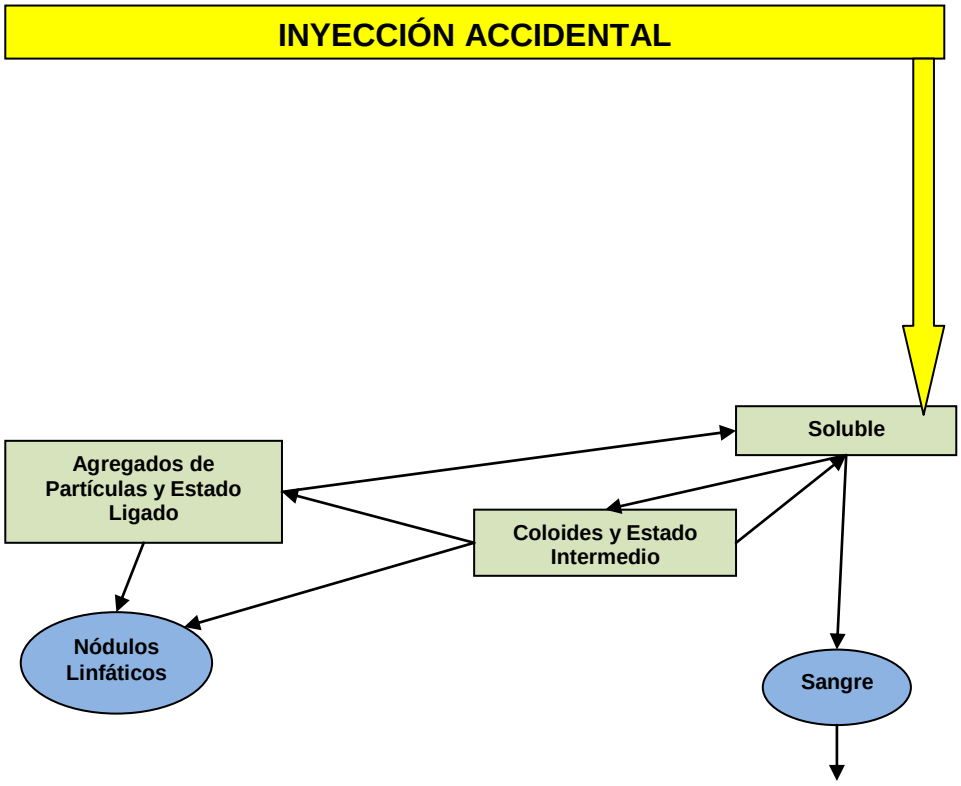


Figura 1.3 Modelo Soluble

La variación en la retención de actividad en la herida con el tiempo para las 4 categorías solubles por defecto se presenta en la ***Figura 1.4***

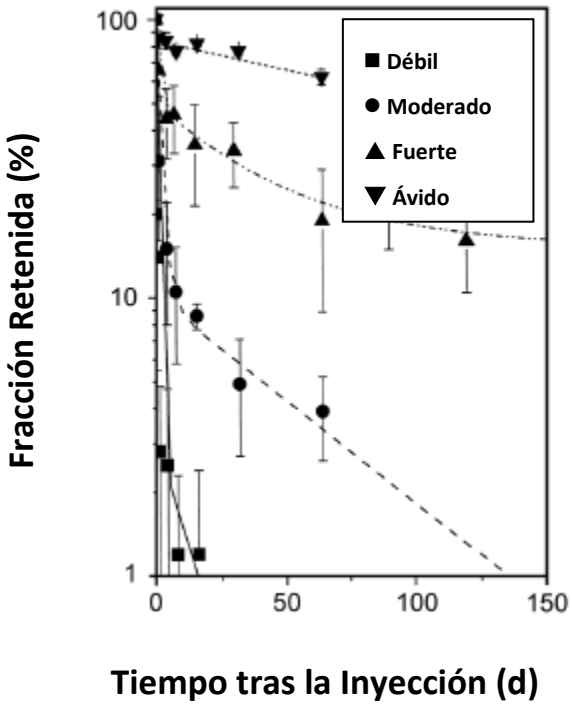


Figura 1.4 Retención por defecto en la herida para los materiales solubles de referencia (figura 4.9 de la NCRP-156)

El comportamiento en la herida de los radionucleidos en forma de partículas se ha agrupado en 3 principales categorías; coloides, partículas y fragmentos. Estas tres categorías se fundamentan en las propiedades físicas del material depositado en la herida y en su patrón de retención. Los fragmentos y las partículas son ambos materiales sólidos, ya sean materiales sólidos contaminados con radionucleidos o esencialmente sustancias puras como el Plutonio o los metales u óxidos de Uranio empobrecido. Sin embargo, los coloides se forman generalmente como productos de la hidrólisis de los metales radiactivos y tienen también propiedades de partículas. Las partículas insolubles pueden tener una liberación importante a los nódulos linfáticos mientras que los materiales solubles no la tienen.

Las heridas también pueden contener significativas cantidades de material que pueden causar reacciones inflamatorias en el tejido de la herida. Como consecuencia se pueden formar encapsulamientos o captaciones biológicas que constituyen una barrera biológica ante la liberación de la actividad de la herida. Este proceso está modelado mediante el compartimento "***partículas atrapadas y agregados***".

La categoría ***Coloides*** está compuesta por radionucleidos que existían ya en forma coloidal antes de su depósito en la herida. Pequeñas fracciones de estos materiales en forma coloidal se liberan rápidamente de la herida. El modelo general de la categoría ***coloidal*** se representa en la ***Figura 1.5***.

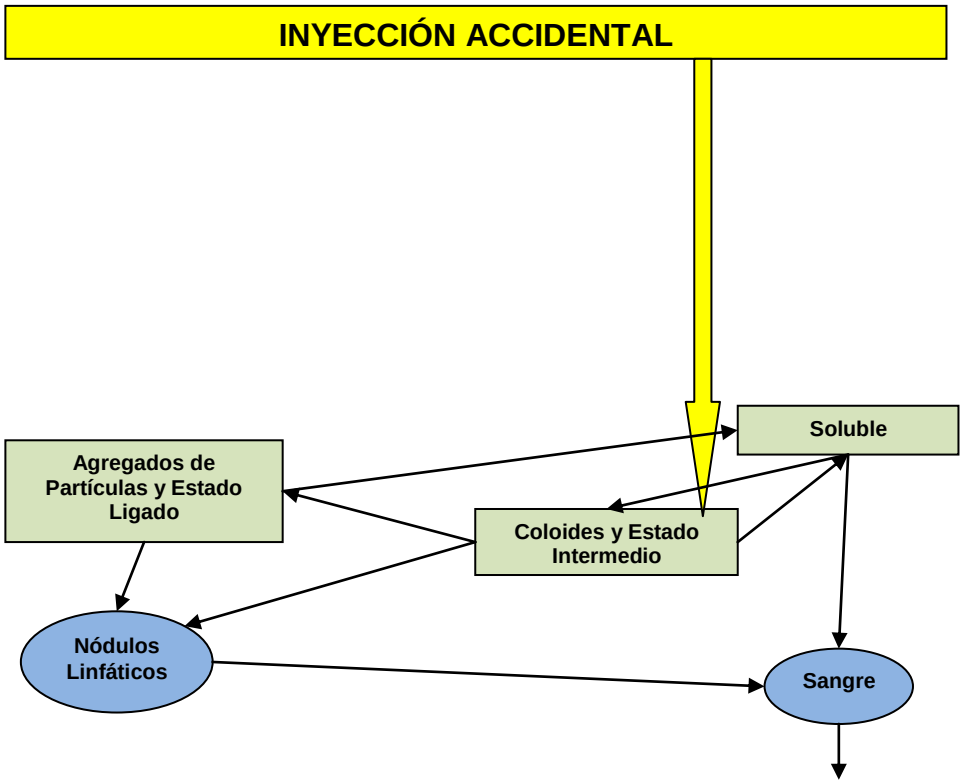


Figura 1.5 Modelo Coloidal

La categoría de ***Partículas*** está compuesta típicamente por materiales relativamente insolubles cuyos tamaños físicos individuales son ***menores*** de ***20 μm***. Este valor superior limita de forma general el tamaño de las partículas que pueden ser fagocitadas por los macrófagos del tejido o ser transportados hasta los nódulos linfáticos recolectores a través del flujo linfático. El modelo de ***Partículas*** se representa en la ***Figura 1.6***.

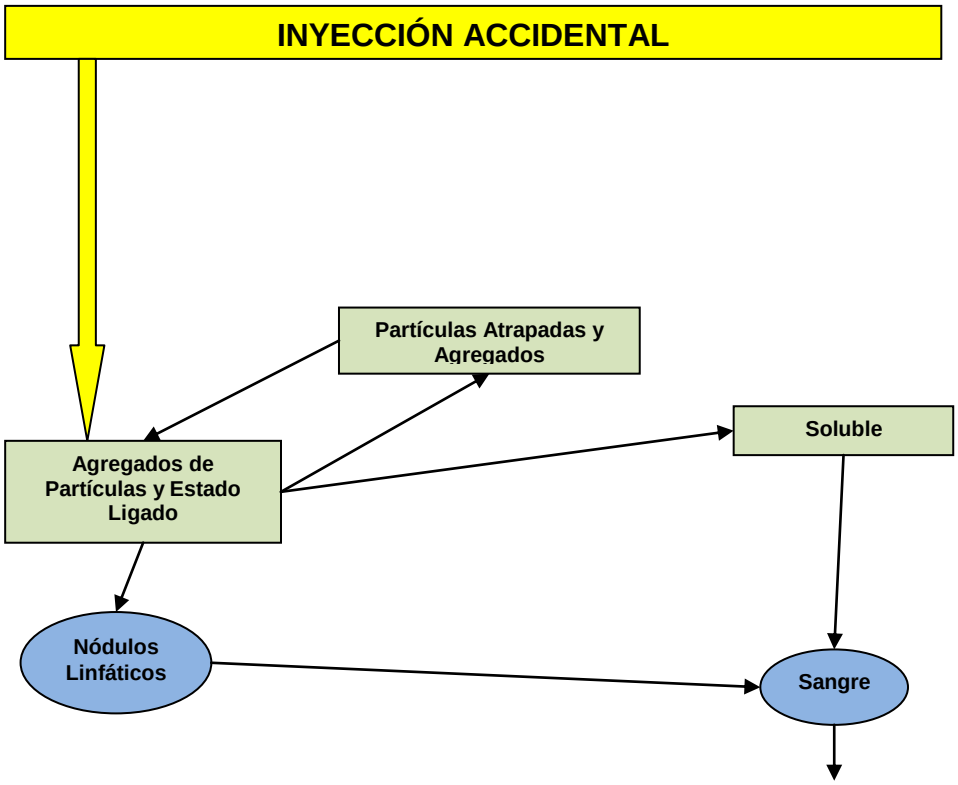


Figura 1.6 Modelo de Partículas

La categoría de ***Fragmentos*** incluye partículas grandes y fragmentos cuyo tamaño y/o cantidad de material son suficientes para originar una reacción del organismo ante cuerpos extraños en las que el tejido fibroso conectivo recubre el material depositado lo que retarda el movimiento físico o químico del material de la herida. El modelo de Fragmentos se representa en la ***Figura 1.7.***

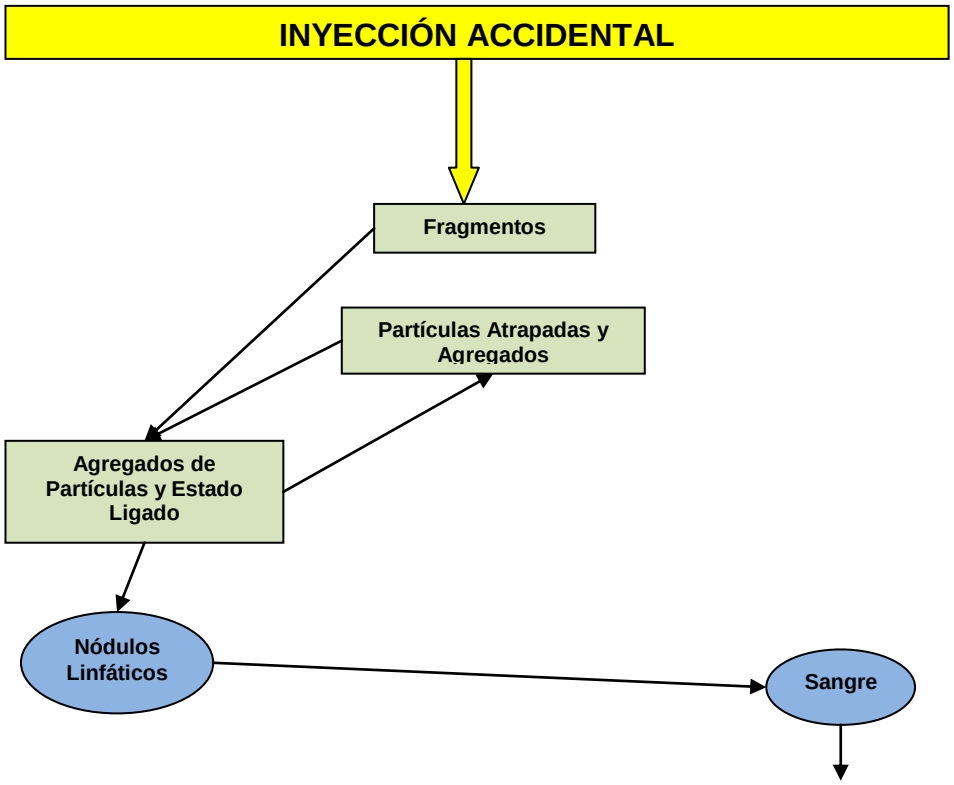


Figura 1.7 Modelo de Fragmentos

La observación más relevante y consistente en cuanto a la retención de estar tres categorías (***Coloides, Partículas*** y ***Fragmentos***) es la retención muy prolongada de la mayor parte del material depositado en la herida. Se conjetura que esta retención de larga duración es debida a la insolubilidad intrínseca de los compuestos de los materiales de los que se dispone de información porque han sido estudiados, fundamentalmente Uranio y Plutonio y al fenómeno del recubrimiento (encapsulamiento) ante cuerpos extraños, aunque este último efecto no es condición necesaria para una retención prolongada.

Para cada una de las categorías por defecto del modelo, la retención ***R(t)*** en la herida se puede representar por una suma de tres exponenciales como sigue:

$$R(t) = \sum_i a_i . e^{-\lambda_i t}$$

Con ***R(t) = 1*** para ***t=0***.

Los coeficientes a_i y λ_i de estas exponenciales que proporcionan soluciones "exactas" para cada las categorías de retención por defecto vienen dadas en la ***Tabla 1.6*** (*Nosske 2008*). Para el cálculo de la función de retención en la herida para un radionucleido dado, hay que tener también en cuenta en el exponente la constante del decaimiento radiactivo λ_{ri} de la siguiente forma

$$R(t) = \sum_i a_i . e^{-(\lambda_i + \lambda_{ri})t}$$

Tabla 1.6 Coeficientes a_i y λ_i (d^{-1}) de las funciones exponenciales que describen laretención en heridas del modelo de herida de la NCRP

Categoría	a_1	λ_1	a_2	λ_2	a_3	λ_3
Débil	0,6734	65,89	0,2897	2,16	0,0369	0,077
Moderada	0,5974	75,16	0,3099	0,306	0,0927	0,018
Fuerte	0,5180	1,28	0,2610	0,023	0,2210	9,60E-04
Ávida	0,1888	37,03	0,0007	10	0,8105	9,70E-04
Coloide	0,0966	0,057	0,9048	7,70E-04	-0,0014	3,02
Partícula	0,0750	0,047	0,9250	2,90E-04	-	-
Fragmento	0,9947	2,84E-06	0,0054	8,00E-03	-0,0001	7,00E-01

Para combinar el modelo de heridas de la ***NCRP*** con el modelo sistémico de un radionucleido en particular, se requieren tanto la tasa de transferencia de actividad a la sangre desde la herida como desde los nódulos linfáticos. De nuevo, la retención en la herida y en los nódulos linfáticos puede describirse como una suma de exponenciales cuyos coeficientes se incluyen en la ***Tabla 1.7***. Estos valores representan las soluciones analíticas del modelo. A su vez estos valores se pueden combinar con el modelo sistémico considerando una incorporación crónica diferida al compartimento de la sangre. En otras palabras, la retención en heridas y nódulos linfáticos debe expresarse como suma de exponenciales como se muestra en la tabla 1.7.

Tabla 1.7 Coeficientes a_i y λ_i (d^{-1}) de las funciones exponenciales que describen las funciones de retención en herida más en los nódulos linfáticos del modelo de la NCRP-156

Categoría	a_1	λ_1	a_2	λ_2	a_3	λ_3	a_4	λ_4
Débil	0,6735	65,89	0,2897	2,16	0,0369	0,0771	0,000012	0
Moderada	0,5974	75,16	0,3099	0,306	0,0926	0,018	0,000122	0
Fuerte	0,5180	1,28	0,2610	0,0227	0,216	9,59E-04	0,004819	0
Ávida	0,1888	37,03	0,00072	10,0	0,7937	9,68E-04	0,01675	0
Coloide	-0,00139	3,02	0,0375	0,057	0,0457	0,03	0,9183	0,000771
Partícula	-2,00E-06	100	0,003031	0,047	-0,75	0,0006	1,7470	0,00029
Fragmento	2,90E-06	0,7045	-0,00121	0,03	0,007345	0,008	0,9948	2,84E-06

1.2.6 La Norma ISO 27048 (2011)

ISO 27048 "***Dose assessment for the monitoring of workers for internal radiation exposure***" (*ISO* 2011) fue desarrollada para mejorar la reproducibilidad de las evaluaciones de dosis llevadas a cabo por diferentes servicios de dosimetría y para asegurar que el nivel de esfuerzo requerido para realizar tales evaluaciones fuera proporcional a la magnitud de la exposición. A pesar de que tanto ***IDEAS*** e ***ISO 27048*** tratan el tema de las evaluaciones de dosis, ambas emplean enfoques diferentes. ***ISO 27048*** especifica unos requerimientos mínimos para las evaluaciones de dosis y define unos procedimientos y suposiciones típicos para una interpretación estándar de los resultados de la vigilancia individual de la exposición interna con el

objetivo de lograr unos niveles aceptables de fiabilidad a fin de demostrar el cumplimiento con la regulación y normativa. Para cumplir con ***ISO 27048***, las evaluaciones de dosis deben seguir todos aquellos procedimientos y suposiciones que están definidos en la norma, aunque no impide a los servicios de dosimetría adoptar métodos o procedimientos adicionales o adoptar criterios de dosis más limitantes que los presentados en la norma.

El proceso general para una evaluación estándar de dosis es similar en ***ISO 27048*** y en ***IDEAS*** aunque hay algunas diferencias como se indica a continuación. La mayor diferencia es que ***ISO 27048*** no especifica ningún método de evaluación de dosis para aquellos casos en los que se puede exceder el límite anual de dosis y la razón esgrimida es que los procedimientos estandarizados no sirven o no son los más apropiados para este tipo de situaciones. ***ISO 27048*** indica que en esos casos ***IDEAS*** si proporciona orientaciones al respecto.

ISO 27048 desarrolla los siguientes aspectos:

a) Procedimientos para las evaluaciones de dosis.
b) Plantear hipótesis para la elección de valores de los parámetros críticos por defecto en la evaluación de dosis.
c) Criterios para determinar la importancia de los resultados de la vigilancia individual de la exposición interna.
d) Interpretación de los resultados de la vigilancia ambiental de los lugares de trabajo.
e) Incertidumbres procedentes del muestreo, técnicas de medida y condiciones de trabajo.
f) Temas especiales:
    - Interpretación de múltiples datos procedentes de diferentes métodos de medida en diferentes tiempos.
    - Tratamiento de los datos por debajo del umbral de decisión.
    - Datos fuera de rango.
    - Calculo de dosis para el embrión/feto y el niño.
g) Registro / documentación de resultados.
h) Garantía de calidad.

A continuación se describen brevemente los procedimientos de ***ISO 27048*** para las evaluaciones de dosis basados en niveles de referencia, para programas de vigilancia rutinaria y especial.

Al igual que en ***IDEAS***, ***ISO 27048*** indica que no es necesaria la evaluación de dosis si la incorporación potencial en un año calendario no da lugar a una dosis anual mayor de ***0,1 mSv***. Este criterio se cumple si el valor de la medida está por debajo del valor crítico M_c. Tanto ***IDEAS***, ***Apartado 3.3*** como ***ISO 27048*** presentan valores de M_c.

Si la comparación con M_c indica que la potencial dosis efectiva anual puede ser mayor de ***0,1 mSv*** y se ha producido una nueva incorporación, entonces la medida hay que interpretarla siguiendo un método estándar de evaluación. Este método estándar de evaluación se desarrolla con los modelos biocinéticos de ***ICRP*** y suponiendo una exposición vía inhalación. Se supone que el momento de la incorporación ocurrió en

el punto medio del intervalo de vigilancia y se adoptan los valores por defecto de ***ICRP*** para el ***AMAD*** y el ***tipo de absorción***. Sin embargo si se dispusiera de valores por defecto específicos del área de trabajo, se podrán utilizar estos últimos en la evaluación.

No hay necesidad de realizar evaluaciones adicionales si se cumple alguno de los criterios siguientes:

a) Si el nivel de confianza del ***97,5 %*** de la potencial dosis anual evaluada es menor que el ***5 %*** del límite anual de dosis (***menor de 1 mSv***). El nivel de confianza se determina considerando únicamente las incertidumbres de la medida.
b) Si no es previsible que se supere el límite anual de dosis. La decisión sobre si el límite anual de dosis se puede superar se basa en un procedimiento que considera la incertidumbre o los rangos de valores posibles de los parámetros específicos relacionados con el material inhalado así como del momento de la incorporación. ***ISO 27048*** proporciona los datos requeridos para este procedimiento para todos los radionucleidos de interés. De forma alternativa la dosis evaluada se puede comparar con el ***nivel de investigación*** definido en ***ISO 20553*** (*ISO 2006*) "***Monitoring of workers occupationally exposed to a risk of internal contamination with radioactive material***" para decidir si el límite anual de dosis se ha superado. El ***nivel de investigación*** se fija en el ***30 %*** del límite anual de dosis (***6 mSv***).
c) Si el análisis indica que se puede haber superado el límite anual de dosis, entonces se debe obtener y aplicar información específica del caso para reducir las incertidumbres. Ejemplos de información específica del caso pueden ser los siguientes: contribuciones a la medida de incorporaciones anteriores, el patrón temporal de la incorporación, valores de ***AMAD*** y de los ***tipos de absorción*** diferentes de los adoptados por defecto, vías de incorporación distintas de la inhalación y resultados de la vigilancia del lugar de trabajo. Tras estos cambios se vuelve a realizar una comparación con los límites de dosis según el párrafo b) anterior.

Si el análisis indica que sigue existiendo la posibilidad de haber superado el límite anual de dosis, se debe aplicar un análisis más sofisticado y se recomienda que sea llevado a cabo por un experto. Sin embargo ***ISO 27048*** especifica que este tipo de análisis más sofisticados están fuera del alcance de la norma.

1.2.7 Próximos documentos de ICRP sobre la Incorporación Ocupacional de Radionucleidos (OIR)

ICRP está inmerso en un proceso de revisión de los coeficientes de dosis para la ***Incorporación Ocupacional de Radionucleidos*** (***OIR***) por inhalación e ingestión. En esta revisión de los coeficientes de dosis, ***ICRP*** ha actualizado también sus modelos dosimétricos y biocinéticos. ***ICRP*** también tiene previsto proporcionar información sobre la absorción en sangre tras la inhalación de diferentes formas químicas de elementos.

Un aspecto importante en esta revisión se refiere a los cambios en el ***Modelo Humano del Tracto Respiratorio*** (***HRTM***) que se actualiza con los datos acumulados en las últimas dos décadas aunque las características básicas del modelo se mantienen. Las partículas inhaladas que contienen los radionucleidos se depositan en la nariz, en los bronquios y en los bronquiolos pulmonares y en la región alveolar respiratoria con depósito en las diferentes regiones en función del tamaño de las partículas tanto en la inhalación como en la exhalación. La remoción de la actividad depositada en los pulmones se produce por

procesos de disolución y absorción en sangre en paralelo con otro por el cual la actividad depositada en los pulmones es extraída hacia la garganta y desde aquí transportada al tracto alimentario. Las proporciones de la actividad depositada que se absorbe en sangre o se dirige al tracto alimentario dependen de la solubilidad del elemento y de su periodo radiactivo. El modelo de ***ICRP*** para el tracto respiratorio es aplicable también para vapores y para los descendientes del radón.

Los principales cambios para la absorción en sangre son:

- Valores para los parámetros específicos del material para la disolución de partículas (f_r, s_r, y s_s) cuando exista información para ello (por ejemplo, para compuestos del ***Uranio***).
- Redefinición de los valores por defecto de las tipos ***F***, ***M*** y ***S***.
- Revisión del tratamiento de gases y vapores.

Los principales cambios en cuanto a la remoción de partículas son:

- Transporte nasal de partículas realista incluyendo la transferencia desde la región nasal anterior a la posterior derivada de estudios con partículas gamma marcadas.
- Revisión de las características de la retención de partículas en el árbol bronquial
- Mayor retención en la región alveolar de los pulmones con una estructura revisada del modelo, obtenida de datos de prolongada retención pulmonar (*Gregoratto 2010*).

La revisión de los modelos biocinéticos se ha hecho con el fin de hacerlos más realistas fisiológicamente con especial atención a la dinámica de la retención y excreción orgánicas de modo que sean aplicables tanto para la interpretación de datos de la vigilancia individual de la exposición interna como para el cálculo de los coeficientes de dosis.

Las modificaciones en la definición de la dosis efectiva, en los factores de ponderación de la radiación y del tejido, en los datos físicos básicos y radiológicos de los radionucleidos y en la actualización de los modelos biocinéticos y dosimétricos aparecerán en los próximos documentos para la ***Incorporación Ocupacional de Radionucleidos*** (***OIR***) que actualizarán los coeficientes de dosis y las funciones de retención y de excreción.

Los documentos ***OIR*** también van a proporcionar en un ***CD-ROM*** que acompañará a la publicación, valores de dosis efectiva por unidad de contenido para una magnitud de bioensayo dada. Estos valores podrán ser utilizados para las evaluaciones simples del ***Nivel 1*** (***Apartado 2.2***).

IDEAS seguirá siendo aplicable para las evaluaciones de dosis tras la publicación de los documentos ***OIR*** de ***ICRP***. Sin embargo, esta revisión de los modelos biocinéticos y dosimétricos será de aplicación dependiendo de las diferentes regulaciones nacionales. Por ejemplo, habrá que recalcular las magnitudes críticas de vigilancia M_c para vigilancia rutinaria y habrá que utilizar los nuevos valores por defecto de tipos de absorción (***tipos F***, ***M*** o ***S***) o los valores específicos de parámetros de absorción para diferentes compuestos (f_r, s_r, s_s, f_b, s_b) que aparezcan en los documentos ***OIR***.

1.3 Actividades desarrolladas con las redes europeas CONRAD y EURADOS

1.3.1 Actividades dentro de CONRAD

La acción coordinada de ***CONRAD*** (*Red Coordinada para la Dosimetría de Radiaciones*) fue financiada por la comisión europea en el contexto del sexto Programa Marco (2005-08) para la investigación y entrenamiento en energía nuclear (Contrato NºFI6R-012684). El objetivo de ***CONRAD*** fue generar una red europea en el campo de la dosimetría de radiaciones para promover las actividades de investigación y difusión del conocimiento.

El grupo de trabajo 5 se ocupó de la coordinación de la labor de investigación en dosimetría interna (*López 2008*). La investigación a coordinar tenía como objetivo general mejorar la fiabilidad en la estimación de las exposiciones resultantes de la incorporación de radionucleidos en el organismo. En el grupo participaron miembros de 20 instituciones de 14 países diferentes, siendo el *CIEMAT* el centro que lideró dicho grupo.

Algunas de las tareas llevadas a cabo por el grupo de trabajo estuvieron muy relacionadas con temas de interés para la aplicación de las ***Guía***:

- Cálculo de los valores de los factores de dispersión (***SF***) para diferentes radionucleidos y tipos de datos de vigilancia utilizando casos reales seleccionados de la base de datos de ***IDEAS*** (*Marsh, 2007)*. Los valores calculados estaban, en líneas generales, en consonancia con los valores inicialmente sugeridos por ***IDEAS*** en base al juicio de expertos, únicamente los factores de dispersión para casos de excreción fecal estaban en la parte baja del rango sugerido por ***IDEAS***.
- Implantación del nuevo modelo para heridas de la ***NCRP*** (*NCRP 2006*) (Ver sección 1.2.5). Las evaluaciones de los casos de contaminación a través de heridas se realizaron mediante la aplicación de la filosofía de la ***Guía IDEAS***.
- Empleo de un factor de partición entre el hígado y esqueleto para el ajuste de parámetros del modelo sistémico en el caso de actínidos.
- Refinamiento de las metodologías para la determinación de un ***AMAD*** efectivo en el caso de evaluaciones especiales.
- Propuesta de criterios a aplicar (número y tipo de técnicas de medida a emplear) como requerimientos para la estimación de dosis internas.
- Sustitución de la página original de ***IDEAS*** por la de *IDEAS/ENEA* (www.bologna.enea.it/attivita/ideas.html). Los resultados del ejercicio de intercomparación *IDEAS/IAEA* de estimación de dosis interna puede descargarse desde este sitio web, así como otros importantes documentos e informes relacionados con las actividades de ***IDEAS***, ***CONRAD*** e ***ICRP***.
- Actualización de las bases de datos de contaminación interna de ***IDEAS*** con nuevos casos. La bibliografía de ***IDEAS*** así como sus bases de datos de contaminación interna se actualizaron con nuevos datos. Las tres bases de datos de ***IDEAS*** están disponibles para la comunidad de profesionales de dosimetría interna a través de la web de *SCK.CEN* (www.sckcen.be/ideas/) (*Marsh 2008*).

Después del cumplimiento del proyecto CONRAD el grupo de trabajo de dosimetría interna fue transformado en un grupo de trabajo estable en EURADOS (WG7; eurados.org).

1.3.2 Curso de entrenamiento EURADOS/IAEA

Para atender la necesidad de un entrenamiento avanzado en la aplicación de la ***Guía IDEAS***, el grupo de trabajo 7 de ***EURADOS*** promovió, de forma conjunta con el ***OIEA***, un curso avanzado de estimación de dosis interna. Este curso tuvo lugar en *Praga* en febrero de 2009 y tenía como objetivo el entrenamiento de profesionales del campo de la dosimetría y difundir los avances producidos durante el proyecto ***CONRAD***. Se llevaron a cabo las lecciones teóricas acerca de la aplicación de la ***Guía IDEAS*** junto con la explicación de numerosos ejemplos y ejercicios durante los 5 días de duración del curso.

El curso utilizó un sitio web dedicado al desarrollo del mismo que disponía de herramientas para compartir documentación y ejercicios así como para recoger los resultados de las evaluaciones realizadas.

En la etapa final del curso, se distribuyó entre los participantes del curso 4 casos prácticos denominados "*Exercises Left to Participants – ELP Cases*" que fue una especie de ejercicio de intercomparación un poco peculiar que tuvo lugar al final del curso de entrenamiento y en el que los participantes debían evaluarlos en un período de 7 horas.

Los principales resultados de este ejercicio de intercomparación se pueden resumir como sigue: la mitad de las personas que llevó a cabo el ejercicio lo hicieron correctamente aplicando la ***Guía IDEAS***. En comparación con el anterior ejercicio de Intercomparación (ver punto 1.1.2) el porcentaje de alumnos que aplicó correctamente la guía aumento de un 20% al 50%.

Además, en este caso fue posible la identificación de errores de diferente naturaleza: errores triviales (principalmente de transcripción), errores conceptuales o relacionados con el uso correcto de los factores de dispersión en el protocolo de medidas rutinarias. La coherencia entre los modelos utilizados para las funciones de retención ***m(t)*** y los empleados para los coeficientes de dosis seguía siendo una fuente de errores, incluso entre el personal entrenado (*Castellani 2010*).

1.4 Revisión de la Guía IDEAS

Nuevos desarrollos tras la publicación de la guía en el año 2006 hicieron que el ***WG7*** de ***EURADOS*** estableciera un grupo de trabajo con la misión de actualizar la guía para incluir:

- El trabajo llevado a cabo en el proyecto ***CONRAD***: Nuevos valores de los factores de dispersión ***SF***, perfeccionamiento de la evaluación del ***AMAD*** efectivo e información adicional acerca del número mínimo de medidas y tipo de datos requeridos en el proceso de estimación de dosis.
- Procedimientos especiales para contemplar casos de incorporación vía heridas siguiendo la publicación del modelo de heridas.
- Procedimiento para métodos directos de estimación de dosis.
- Ejemplos para la correcta aplicación de la ***Guía*** extraídos del reciente curso de entrenamiento avanzado de ***EURADOS /IAEA*** de estimación de dosis.
- Consideración de la normativa ***ISO*** para estimaciones de dosis en programas de vigilancia de trabajadores expuestos a exposición interna.
- Consideración de los próximos documentos ***OIR*** de ***ICRP***.
- Descripción más detallada del procedimiento de ajuste de datos.
- Pruebas estadísticas adicionales para el ajuste de datos.
- Composiciones isotópicas típicas del ***U*** y del ***Pu***.

El documento servirá de guía en los siguientes aspectos:

- Principios a aplicar en dosimetría interna: armonización, exactitud y proporcionalidad.
- Información detallada acerca del manejo y evaluación de la información obtenida en las medidas, contemplando el proceso de datos y la estimación de incertidumbres.
- Procedimiento detallado para la estimación de incorporaciones a partir de medidas únicas o conjuntos de medidas.
- Aspectos especiales del manejo de datos: valores por debajo del LD, influencia de las terapias de desincorporación, tipo y número mínimo de medidas requeridas para la estimación de dosis.
- Criterio para rechazar un ajuste de las predicciones del modelo a unos datos experimentales dados.
- Enfoque estructurado del proceso de estimación de dosis consistente en un procedimiento paso a paso descrito convenientemente mediante diagramas de flujo con texto explicativo adjunto.

La guía también posee un capítulo en el que se dan soluciones de referencia para casos de contaminación (***sección 13***) y anexos (***sección 14***) para ajustes de datos, pruebas estadísticas y valores típicos de la composición isotópica de compuestos de ***Uranio*** y ***Plutonio*** que se encuentran en la industria nuclear.

2. Generalidades de la Guía IDEAS

La ***Guía IDEAS*** desarrolla un método o procedimiento ordenado y estructurado para poder realizar la **m**ejor estimación de la incorporación y de las dosis efectivas comprometidas y/o dosis a órganos o tejidos asociadas a una incorporación de materiales radiactivos al organismo.

En los últimos años la metodología "***Bayesiana***" ha sido utilizada con asiduidad por la necesidad de evaluar las incertidumbres relacionadas con las dosis obtenidas. En estos casos lo que se obtiene es una distribución de probabilidades en vez de un "***único valor de la mejor estimación***" (*G. Etherington 2006*, *Miller 2003*).

Aunque los autores de la ***Guía IDEAS*** reconocen que la metodología Bayesiana proporciona más información sobre la situación real de una exposición interna aun teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia de incorporaciones poco usuales, siguen sugiriendo la aplicación de esta ***Guía*** fundamentada en los 3 principios que se indican a continuación para lograr una armonización de las dosis evaluadas para la mayoría de los casos a considerar.

2.1 Principios

En el proceso de evaluación de las dosis comprometidas a partir de datos de vigilancias individuales (medidas de la actividad corporal o en sus excretas) tras una incorporación de radionucleidos, el responsable de tal evaluación tendrá que establecer hipótesis sobre factores tales como la vía de incorporación y las propiedades del material radiactivo incorporado. Cuando se dispone de más de una medida, variables como el peso que se le da a cada medida pueden alterar de forma importante el resultado final. Recientes ejercicios de intercomparación han puesto de manifiesto que se sigue obteniendo un amplio rango de valores de dosis como resultado de las hipótesis realizadas sobre estos factores mencionados con anterioridad, y por lo tanto, sigue siendo conveniente una orientación común para armonizar las evaluaciones dosimétricas.

Los procedimientos que se proponen en este capítulo se basan en los siguientes principios:

- ***Armonización***: siguiendo la guía, dos evaluadores cualesquiera, deberían obtener la misma estimación de la dosis a partir de un mismo conjunto de datos o al menos llegar a entender las razones de las diferencias.
- ***Exactitud***: a partir de los datos disponibles, se debe llegar a obtener la "***mejor***" estimación de la incorporación y dosis.
- ***Proporcionalidad***: el esfuerzo aplicado a la evaluación de la dosis debe ser proporcional a la magnitud de la misma, a menor dosis, más sencillo debe de ser el proceso de su estimación.

2.1.1 Armonización

Para cumplir con los principios arriba enunciados, se necesita un procedimiento perfectamente definido y por ello el proceso que se detalla en la guía se ilustra por medio de una serie de diagramas de flujo. En la medida de lo posible, el proceso estructurado se ha hecho de manera que tenga la mayor aplicación posible de forma que el evaluador no tenga necesidad de utilizar sofisticadas herramientas de software para interpretar los datos. En situaciones de vigilancia rutinaria en las que típicamente solo se dispone de una única medida por cada incorporación, el procedimiento de evaluación debe ser sencillo. Sin embargo en situaciones especiales de vigilancia en las que se dispone de más de una medida y muy posiblemente de más de un tipo de medidas (orina, heces), diferentes opciones para el tratamiento de los datos pueden conducir a diferentes evaluaciones de dosis, aun cuando se haya utilizado el mismo modelo metabólico, valores de los parámetros del modelo y software. También se puede llegar a obtener diferentes dosis tras la evaluación cuando es conveniente considerar un cambio en los valores por defecto de los parámetros de los modelos metabólicos de ***ICRP***. En esta guía se proponen alternativas para aplicar una metodología sistemática en la evaluación de dosis para todo tipo de situaciones. En cada situación, sin embargo, será importante registrar cualquier desviación o cambio en los valores por defecto de los parámetros de los modelos metabólicos de ***ICRP*** utilizados en la evaluación de dosis.

2.1.2 Exactitud

Es un hecho cierto que las incertidumbres asociadas con la dosis interna evaluada pueden ser considerables, especialmente en el caso de los actínidos que son difíciles de detectar en el cuerpo y que tienen coeficientes de dosis relativamente elevados (***Sv Bq^{-1}***). Si la estimación inicial de dosis excede ***1 mSv***, no se puede excluir la posibilidad de que la dosis sea sustancialmente mayor (p.e. ***6 mSv***). Es por ello importante hacer el mejor uso de la información que se disponga, y en ese mejor uso de la información, pudiera ser necesario modificar los valores por defecto de ***ICRP*** de algunos parámetros de los modelos biocinéticos para lo que es conveniente disponer de orientaciones sobre cómo estos parámetros pueden razonablemente variar de acuerdo a las circunstancias de cada caso.

2.1.3 Proporcionalidad

El esfuerzo empleado en la evaluación de los datos procedentes de la vigilancia de la incorporación se deberá corresponder en líneas generales con el nivel esperado de exposición y complejidad del caso. Por un lado, si es muy probable que la exposición sea muy pequeña con respecto a los límites de dosis, se podrán aplicar procedimientos sencillos de evaluación aunque conlleven incertidumbres relativamente altas. Por otro lado, si los datos de la vigilancia dosimétrica indican que la exposición está cercana o puede superar los límites de dosis, será necesario aplicar procedimientos de evaluación mucho más sofisticados. Para estos casos habrá que contar con cualquier información específica del estudio en cuestión para que la incertidumbre y la desviación de la mejor estimación sean las menores posibles.

2.2 Niveles de tareas

El esfuerzo dedicado para la evaluación de los datos de la vigilancia de la exposición interna tras una incorporación de radionucleidos debería corresponder con el nivel previsto de exposición en un área en particular de la instalación o de un grupo de trabajadores. Se puede definir una "***dosis anual***" como la dosis efectiva comprometida por incorporación de radionucleidos que tiene lugar durante el año calendario. La dosis anual esperada para los trabajadores, evaluada de forma prospectiva (***a futuro***), se puede utilizar como criterio cuantitativo para planificar el alcance de los procedimientos que se necesitan para la vigilancia individual de la exposición interna y para la interpretación de los resultados de esta vigilancia. Se considera que la metodología ***IDEAS*** puede ser de utilidad general para la evaluación de dosis internas cuyos elementos claves se tratan a continuación. Esta metodología está estructurada en forma de niveles de tareas que se pueden elegir en función de las circunstancias de cada exposición.

Con respecto a la protección radiológica operacional, se proponen la siguiente estructura de "***Niveles de Tareas***".

2.2.1 Nivel 0 (dosis efectiva comprometida menor de 0,1 mSv/año)

Para incorporaciones potenciales que puedan resultar en una dosis anual menor de ***0,1 mSv***, no se requiere evaluación de dosis. Esto es lo más apropiado aun cuando se puedan producir exposiciones similares a lo largo del periodo de vigilancia de un año. En este nivel de exposición, no hay necesidad de forma general, de evaluar explícitamente los resultados de las medidas (no hay que determinar ni la incorporación ni la dosis asociada). La dosis efectiva se puede asimilar a cero en analogía con el redondeo de las dosis en dosimetría externa. Sin embargo, los resultados de las medidas se deben guardar para posibles estimaciones futuras.

Se puede establecer una magnitud ***M*** (asociada con la actividad retenida o con la excreción diaria) asociada a este nivel ***0*** si es menor que un valor dado definido como "***magnitud crítica de vigilancia***" ***Mc***. Los valores de ***Mc*** se tratan en el ***apartado 3.3***.

2.2.2 Nivel 1 (0,1 mSv/año < dosis efectiva comprometida < 1 mSv)

La evaluación de la dosis es sencilla, utilizando los valores por defecto de los parámetros de ***ICRP***. En el ***nivel 1*** el evaluador se enfrenta generalmente con radionucleidos de fácil medida, p.e. emisores gamma de alta energía, en los que se puede detectar fácilmente valores de actividad que se corresponden con pequeñas incorporaciones y dosis asociadas y para los que es improbable que puedan representar problemas reales en el tratamiento de sus datos de vigilancia.

Cuando se disponga de una mejor información ***a priori***, (por ejemplo información sobre la distribución de los tamaños de partículas en los casos de inhalación), el evaluador podría optar por una evaluación más sofisticada como la del ***Nivel 2***.

2.2.3 Nivel 2 (1 mSv < dosis efectiva comprometida < 6 mSv)

Esta evaluación más sofisticada que las dos anteriores, emplea información adicional, generalmente del lugar de trabajo, para conseguir una determinación más realista de la dosis. En el ***Nivel 2*** los evaluadores tendrán que enfrentarse con radionucleidos de difícil medida pero con actividades que supondrán dosis pequeñas. Ejemplos para este caso son los isótopos de ***Uranio***, ***Torio***, ***Plutonio*** o ***Am-241*** en incorporaciones rutinarias por inhalación. También se puede utilizar este ***Nivel 2*** en una incorporación incidental o accidental. Se harán comparaciones de las predicciones del modelo (el "ajuste") con los datos medidos para optar entre otros valores alternativos de los parámetros o para encontrar los valores óptimos de estos parámetros (***a posteriori***). En este nivel, únicamente se deben ajustar los parámetros relacionados con las características (físicas y/o químicas) del material radiactivo incorporado y con el momento de la incorporación (si es desconocido).

2.2.4 Nivel 3 (dosis efectiva comprometida ≥ 6 mSv)

Esta es evaluación de la dosis más sofisticada y se realiza en aquellos casos para los que se dispone de una información completa de datos de vigilancia como pueden ser los casos de exposiciones cerca de los límites de dosis y probablemente relacionadas con un accidente. La evaluación en este caso es una extensión del ***Nivel 2***, y los parámetros que se ajustan se refieren fundamentalmente al sujeto (tasas de transporte del modelo pulmonar ***HRTM*** para incorporaciones por inhalación, etc.). El aspecto fundamental en este nivel es que los parámetros del modelo se van ajustando de un modo sistemático, "***paso a paso***", hasta obtener una bondad aceptable del ajuste (p.e. los ajustes que se obtienen con todos los datos no son rechazados por el criterio específico de valoración de la bondad del ajuste). Si se modifica el valor por defecto de cualquier parámetro de los modelos biocinéticos de ***ICRP***, se registrarán estos valores modificados que serán además los que se utilicen en el cálculo de las dosis efectivas comprometidas y efectivas. Tal procedimiento podría tener que ser autorizado por la autoridad reguladora del país.

3. Programas de vigilancia

3.1 Objetivos y naturaleza de los programas de vigilancia

Los objetivos generales de los programas operacionales de vigilancia de la exposición interna se reflejan en la guía de seguridad del ***OIEA RS-G-1.2*** de 1999. En esta guía se indica además un criterio para decidir cuándo es conveniente o necesario llevar a cabo programas individuales de vigilancia en personas expuestas. Se explican los tipos de vigilancia y se presentan las vigilancias rutinarias y especiales.

La norma internacional ***ISO 20553*** del año 2006, da orientaciones para decidir cuando son necesarios los programas de vigilancia y como deben diseñarse. Su objetivo es racionalizar los esfuerzos aplicados en estos programas de vigilancia de la exposición interna en concordancia con los requerimientos legales y con los objetivos de los programas generales de protección radiológica. En particular sugiere periodos máximos de vigilancia para los distintos radionucleidos con tolerancias para la vigilancia rutinaria y recomienda métodos para los programas especiales de vigilancia tras la inhalación.

El objetivo de la vigilancia de la exposición interna a radionucleidos es verificar y documentar que el trabajador está adecuadamente protegido contra los riesgos de las radiaciones ionizantes y que la protección radiológica que se le proporciona cumple con los requerimientos legales. Dos son los tipos de vigilancia de la exposición interna de trabajadores que se pueden contemplar, la vigilancia del ambiente de trabajo y la vigilancia individual.

La vigilancia individual proporciona la información necesaria para evaluar la exposición de un trabajador a partir de la medida de la actividad corporal, de las tasas de excreción (orina o heces) o de la actividad inhalada (con muestreadores de aire personales, ***PAS***). La vigilancia del ambiente de trabajo que implica una vigilancia colectiva, evalúa la exposición de un grupo de trabajadores suponiendo idénticas condiciones de trabajo para todos ellos, p.e. riesgos de incorporación, así como todos los factores que influyen en las dosis resultantes. Un ejemplo de la vigilancia del ambiente de trabajo es la medida de las concentraciones de radionucleidos en aire utilizando muestreadores de aire estáticos. En algunos casos la vigilancia ambiental es necesaria para apoyar la vigilancia individual y puede ser indicativa de una liberación de radionucleidos al ambiente de trabajo que active o inicie una vigilancia individual. ***ISO 20553*** (2006) recomienda iniciar la vigilancia del ambiente de trabajo si la dosis efectiva comprometida anual puede exceder de ***1 mSv*** y la vigilancia individual si la dosis es superior a ***6 mSv***.

Existen diferentes categorías de vigilancia individual. La vigilancia rutinaria de la exposición interna se realiza a frecuencias predeterminadas para asegurar unas condiciones radiológicas seguras y satisfactorias del ambiente del trabajo de los trabajadores potencialmente expuestos. ***ISO 20553*** (2006) recomienda definir el periodo de la vigilancia rutinaria de forma tal que las incorporaciones que contribuyan a una dosis total anual de ***1 mSv*** puedan ser fácilmente detectables de forma que la máxima subestimación potencial

que se pueda hacer en la incorporación y en la dosis no exceda un ***factor 3*** suponiendo que dicha incorporación única ocurrió en el punto medio del intervalo de vigilancia.

Los programas especiales de vigilancia son de carácter investigador; se basan en una combinación apropiada de medidas directas (***in-vivo***) e indirectas (***in-vitro***) conforme con el modelo biocinético en consideración. Normalmente se inician tras un resultado de un programa rutinario de vigilancia que supera algún valor predefinido de un nivel derivado de referencia. Los programas especiales de vigilancia deberían proporcionar suficiente información para realizar una evaluación precisa de dosis y servirse y beneficiarse de cualquier otra información sobre las circunstancias de la incorporación, especialmente en relación con el tiempo transcurrido entre la incorporación y la medida.

Se pueden llevar a cabo otros programas de vigilancia en relación con un trabajo en particular o para determinar incorporaciones reales en condiciones reales o supuestamente anormales de trabajo. En estas circunstancias el momento de la incorporación real o potencial se suele conocer y la vigilancia del ambiente de trabajo puede proporcionar alguna información sobre la forma química o física de los radionucleidos.

Pueden ser requeridos también programas confirmatorios de vigilancia para verificar la efectividad de las medidas de protección utilizadas sobre las condiciones de exposición de algunos procedimientos de trabajo empleados y pueden consistir tanto en medidas individuales como del ambiente de trabajo.

3.2 Umbral de decisión y límite de detección

Las transformaciones nucleares son procesos aleatorios que siguen la estadística de ***Poisson***. El recuento de una muestra radiactiva se ve siempre afectado por un fondo resultante de la radiación natural o de la actividad de otros radionucleidos de la muestra. También se supone que este fondo radiactivo sigue la estadística de ***Poisson***.

Las cuentas brutas totales o medidas N_G, son la suma de las cuentas del fondo N_B y de las cuentas de la actividad de interés contenidas en la muestra (***in-vitro***) o en el organismo (***in-vivo***) N_n (cuentas netas).

$$N_G = N_B + N_n$$

N_B se puede determinar midiendo el efecto de la tasa de cuentas (λ_B) del fondo en ausencia de la actividad de interés contenida en la muestra. Por tanto, $N_G = \lambda_B T_S$ en donde T_S es el tiempo de medida de la muestra. Sin embargo el fondo es variable y fluctúa alrededor de su valor medio de acuerdo con la distribución de ***Poisson***, por tanto un valor positivo, aunque pequeño de N_n puede ser una mera consecuencia de la fluctuación del fondo en vez de representar una presencia de actividad de la muestra de interés.

Para tener esto en cuenta se define el ***umbral de decisión*** (***UD***) de forma tal que si el resultado de una medida real que cuantifica un efecto físico (por ejemplo, la presencia de un radionucleidos en una muestra) es mayor que ***UD***, entonces se decide que el efecto físico está presente (*ISO 2010ª, 2010b*). Si el resultado de la medida es **< *UD*** entonces el resultado no se puede atribuir al efecto físico, aunque no se pueda concluir que no exista.

Se diseña el test estadístico de forma tal que si el radionucleidos realmente no está presente (solo existe el efecto del fondo), entonces la probabilidad de tomar la decisión equivocada al decir que sí está presente es igual a una probabilidad especifica α (***ISO 11929*** (*2010*)).

En aquellos casos en que N_B sea suficientemente grande, mayor de ***30***, en los que la distribución de ***Poisson*** se puede aproximar por una distribución ***normal*** (***Gaussiana***), el ***umbral de decisión UD*** se puede expresar como sigue ***ISO 11929*** (*2000*).

$$UD = C_{rn} k_{1-\alpha} \sqrt{\lambda_B \left(\frac{1}{T_B} + \frac{1}{T_S}\right)}$$

Donde

- C_{rn} es un factor de normalización que convierte la tasa de cuentas en actividad (Bq por cps)
- T_B es el tiempo de medida del fondo
- T_S es el tiempo de medida de la muestra
- λ_B es la tasa de cuentas del fondo igual al cociente entre las cuentas N_0 del fondo encontradas durante el tiempo T_B de medida del fondo; $\lambda_B = N_0/T_B$
- $k_{1-\alpha}$ es el percentil $1-\alpha$ de la ***distribución normal***. Para un riesgo α del ***5%***, $k_{1-\alpha}$ = **1,645**.

Dada la naturaleza estocástica del proceso de medida, no se puede concluir que el radionucleido no esté presente si el resultado de la medida es **< *UD***; solo se puede afirmar que el radionucleidos no ha sido detectado en la medida.

Se define el ***límite de detección*** (***LD***) como el valor verdadero más pequeño de una magnitud que se está midiendo, que será detectado por el procedimiento de medida en particular con una cierta probabilidad específica si el radionucleido está realmente presente (***ISO 11929*** (*2010*) ***e ISO 28218*** (*2010*)). Partiendo de la base de que el radionucleido está presente en la muestra o en el organismo, el ***LD*** se refiere al valor verdadero más pequeño de la magnitud medida para el cual, al aplicar la regla de decisión indicada antes (probabilidad específica de detección), la probabilidad de concluir que el radionucleido no esté presente no excede un valor específico β.

De nuevo, en aquellos casos en que N_B sea suficientemente grande, mayor de ***30***, en los que la distribución de ***Poisson*** se puede aproximar por una distribución ***normal*** (***Gaussiana***), el ***límite de detección LD*** se puede expresar como sigue (*ISO2000*):

$$LD = UD + C_{rn} k_{1-\beta} \sqrt{\lambda_B \left(\frac{1}{T_B} + \frac{1}{T_S}\right)} = C_{rn}\left(k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}\right) \sqrt{\lambda_B \left(\frac{1}{T_B} + \frac{1}{T_S}\right)}$$

Para una probabilidad de error del ***5%*** para α y β, los valores de $k_{1-\alpha}$ y $k_{1-\beta}$ son los dos iguales a ***1,645***, por lo tanto $k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}$ = ***3,29***. Típicamente, si $\beta = \alpha$ y N_G es suficientemente grande, entonces ***UD ≈ 0,5 LD***. La ***Figura 3.1*** describe gráficamente el ***umbral de decisión*** y el ***límite de detección***.

El ***límite de detección LD*** permite decidir si un método específico de medida satisface los requerimientos exigidos y consecuentemente si es apropiado para el propósito de una medida en particular (*ISO's 2010*). Dicho de otra forma, para verificar si un procedimiento de medida es apropiado para medir el mesurando que se pretende, el ***límite de detección*** se ha de comparar con un valor específico establecido en guías, por ejemplo, de acuerdo con requerimientos específicos sobre la sensibilidad del procedimiento de medida por razones científicas, legales u otras. Si el ***límite de detección*** calculado es menor que el valor de la guía, el procedimiento de medida es apropiado, y si no, no lo es.

Se pueden determinar ***a priori*** valores típicos del ***LD*** para un radionucleido dado y para un procedimiento de medida en particular antes de que la medida de la muestra tenga lugar. Por el contrario, el ***UD*** y el ***LD*** asociados con la medida que se está efectuando han de evaluarse ***a posteriori*** después de que la medida ya ha sido realizada.

Algunas veces el ***umbral de decisión*** se denomina ***nivel crítico***, ***nivel de decisión*** o ***actividad mínima significativa***. También el ***límite de detección*** se denomina como ***actividad mínima detectable*** o ***límite inferior de detección***.

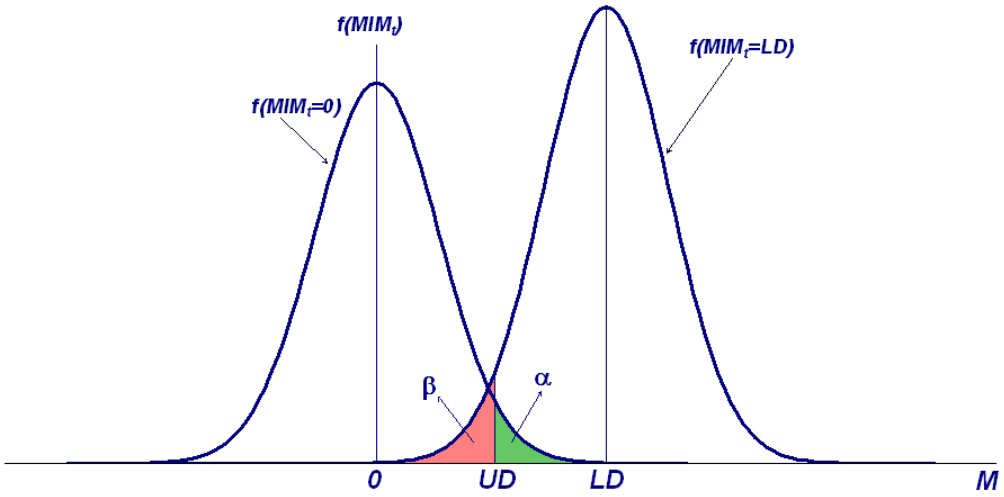


Figura 3.1 Umbral de decisión y límite de detección (LD). La distribución de densidad de probabilidad f(MIM$_t$) es la distribución condicional de las estimaciones M de la medida, dado el valor verdadero M$_t$ de la magnitud medida.

En resumen, habiendo realizado la medida, se compara el resultado de esta con el ***UD***. Si el resultado de la medida es > ***UD*** se decide que el radionucleido está presente con una actividad igual a la actividad medida. Si el resultado de la medida es < ***UD,*** el radionucleido o la actividad no ha sido detectada por el procedimiento de medida empleado, pero no se puede concluir que la actividad no esté presente; en estos casos se dice generalmente que la ***actividad es menor*** que el ***LD***.

Recientes normas ISO (p.e. *ISO 11929:2010, ISO 2010a*) presentan ecuaciones para el ***UD***, el ***LD*** y para la incertidumbre de la medida, basadas en la estadística Bayesiana. La aplicación de estos procedimientos en medidas de bioensayo para el cálculo de los límites característicos (***UD*** y ***LD***) se refleja en ***ISO 28218*** (*ISO 2010b*). El ***anexo B*** de ***ISO 28218*** (*ISO 2010b*) presenta ***4 ejemplos*** de aplicación con fórmulas analíticas

para ***medidas de cuerpo entero***, ***determinación de Pu por espectrometría α, determinación de U en orina por ICP-MS*** y ***medidas de Tritio en orina por centelleo líquido***.

En las siguientes tablas (***por tipos de bioensayo***) se muestran valores típicos y alcanzables de límites de detección para diferentes radionucleidos y métodos de medida (*Hurtgen 2012*).

Es de esperar que estos valores sean consistentes con los valores que va a reportar ***ICRP*** en sus próximos documentos ***OIR*** (***Occupational Intakes of Radionuclides***). En todo caso se recomienda que los valores típicos y alcanzables de los límites de detección que aparezcan en la serie de documentos ***OIR*** de I***CRP*** sean los que se utilicen con preferencia sobre los de las tablas siguientes.

Los valores de las tablas siguientes no han sido obtenidos con las ecuaciones incluidas en las normas ***ISO*** de reciente aparición (*ISO 2010a, 2010b*). Sin embargo, proporcionan una base para evaluar la sensibilidad del método de detección desarrollado por un laboratorio específico y para compararla con el estado del arte en sensibilidades de detección internacionalmente reconocidas para el tipo de medida de bioensayo en consideración.

Tabla 3-1: Valores del límite de detección para medidas de bioensayos en orina

Isótopo	Método de medida	Típico	Alcanzable	Unidades
H-3	Centelleo líquido	100	10	Bq/L
C-14	Centelleo líquido	60	5	Bq/L
P-32	Centelleo líquido	15	0,02	Bq/L
S-35	Centelleo líquido	15	5	Bq/L
Co-57	Espectrometría gamma	1	0,2	Bq/L
Co-58	Espectrometría gamma	0,4	0,1	Bq/L
Co-60	Espectrometría gamma	0,4	0,1	Bq/L
Sr-85	Espectrometría gamma	5	1	Bq/L
Sr-89	Contador proporcional	1	0,05	Bq/L
Sr-90	Contador proporcional	0,4	0,05	Bq/L
Sr-90	Centelleo líquido	0,4	0,1	Bq/L
Zr-95	Espectrometría gamma	5	0,1	Bq/L
Nb-95	Espectrometría gamma	4	0,5	Bq/L
Cs-134	Espectrometría gamma	1	0,04	Bq/L
Cs-137	Espectrometría gamma	2	0,1	Bq/L
Ra-226	Espectrometría alfa	10		mBq/L
Ra-226	Método de emanaciones	5		mBq/L
Ra-226	Contador proporcional	4		mBq/L
Ra-226	Centelleo líquido	3		mBq/L
Th-228	Espectrometría alfa	1	0,1	mBq/L
Th-230	Espectrometría alfa	1	0,05	mBq/L
Th-232	Espectrometría alfa	1	0,05	mBq/L
Th-232	ICP-MS	0,3	0,06	mBq/L
U-234	Espectrometría alfa	0,3	0,05	mBq/L
U-235	Espectrometría alfa	0,3	0,05	mBq/L
U-235	ICP-MS	0,001		μg/L
U-235	ICP-MS	0,08		mBq/L
U-238	Espectrometría alfa	0,3	0,05	mBq/L
U-238	ICP-MS	0,0015		μg/L

U-238	ICP-MS	0,02		mBq/L
U-238	Tr-KPA	0,1	0,06	μg/L
U-238	Fluorimetría	1		μg/L
Np-237	Espectrometría alfa	1	0,1	mBq/L
Pu-238	Espectrometría alfa	0,3	0,05	mBq/L
Pu-239	Espectrometría alfa	0,3	0,05	mBq/L
Pu-239	Espectrometría de Masas por Ionización Térmica (TIMS)	0,01	0,004	mBq/L
Pu-241	Centelleo líquido	30 (medida directa)	0,03*	Bq/L
Am-241	Espectrometría alfa	0,3	0,05	mBq/L
Cm-244	Espectrometría alfa	0,3	0,05	mBq/L

*Tras separación química y redisolución del depósito obtenido para la espectrometría alfa

Tabla 3-2: Valores del límite de detección para medidas de bioensayos de heces

Isótopo	Método de medida	Típico	Alcanzable	Unidades
Ra-226	Contador proporcional	16		mBq/24h
U-234	Espectrometría alfa	1	0,2	mBq/24h
U-235	Espectrometría alfa	1	0,2	mBq/24h
U-238	Espectrometría alfa	2	0,2	mBq/24h
Th-228	Espectrometría alfa	2	0,2	mBq/24h
Th-230	Espectrometría alfa	2	0,2	mBq/24h
Th-232	Espectrometría alfa	2	0,2	mBq/24h
Np-237	Espectrometría alfa	1	1	mBq/24h
Pu-238	Espectrometría alfa	2	0,2	mBq/24h
Pu-239	Espectrometría alfa	2	0,2	mBq/24h
Am-241	Espectrometría alfa	2	0,5	mBq/24h
Cm-244	Espectrometría alfa	2	0,5	mBq/24h

Tabla 3-3: Valores del límite de detección para medidas en pulmones

Isótopo	Método de medida	Típico	Alcanzable	Unidades
U-235	Espectrometría gamma	8	3	Bq
U-238	Espectrometría gamma	50	30	Bq
Th-228	Espectrometría gamma del Pb-212	10	8	Bq
Th-232	Espectrometría gamma del Ac-228	20	10	Bq
Np-237	Espectrometría gamma del Pa-233	25	13	Bq
Pu-239	Espectrometría gamma del Am-241	10	4	Bq
Am-241	Espectrometría gamma	10	4	Bq

Tabla 3-4: Valores del límite de detección para medidas de cuerpo entero por espectrometría gamma

Isótopo	Típico	Alcanzable	Unidades
Mn-54	20		Bq
Co-57	40	30	Bq
Co-58	40	10	Bq
Co-60	40	10	Bq
Se-75	40		Bq
Sr-85	50	20	Bq
Zr-95	50	20	Bq
Nb-95	40	12	Bq
Ag-110m	20		Bq
Cs-134	40	10	Bq
Cs-137	60	15	Bq
U-235	60	40	Bq

Tabla 3-5: Valores del límite de detección para medidas de toroides por espectrometría gamma

Isótopo	Típico	Alcanzable	Unidades
I-125	40	10	Bq
I-131	25	1	Bq

3.3 Determinación de los valores M_c

En la vigilancia rutinaria de la exposición interna se requiere una evaluación explícita de la dosis solo si la medida observada de bioensayo excede una magnitud crítica predefinida. Esta magnitud crítica de vigilancia M_c puede considerarse como la cantidad de actividad retenida o excretada al final de un periodo o intervalo de vigilancia que determina una incorporación tal que, si se diera de nuevo en todos los intervalos de vigilancia durante un año calendario, daría como resultado una dosis efectiva comprometida de **0,1 *mSv/año***. Si se desconoce el momento exacto de la incorporación, se supone entonces que esta tuvo lugar en el punto medio del intervalo de vigilancia (***T/2***), de acuerdo con las recomendaciones de la publicación ***78*** de ***ICRP*** (*ICRP 1977*) y de ***ISO 20553*** (*ISO 2006*).

Para calcular el valor de M_c se emplea la siguiente ecuación:

$$M_c = \frac{10^{-4}.m(T/2)}{e(50)} . \frac{T}{365} \qquad (3.1)$$

Con

M_c Actividad crítica de vigilancia para el ***Nivel 0*** (Bq o Bq/d)

T Intervalo de vigilancia para la magnitud considerada

$m(T/2)$ Función de retención o de excreción correspondiente para la magnitud de vigilancia (la magnitud que se mide) en el momento $t = T/2$ (***Bq o Bq/d por Bq incorporado***). Se supone que la incorporación ha ocurrido en el punto medio del intervalo de vigilancia.

$e(50)$ Coeficiente de dosis (***Sv/Bq***)

Las tablas ***3.6*** a ***3.10*** presentan valores de la ***magnitud crítica de vigilancia*** M_c para diferentes radionucleidos determinados según la ecuación anterior para el caso de inhalación con aerosoles de *5 μm* de ***AMAD*** y para diferentes tipos de bioensayos. Estos valores necesitarán ser actualizados empleando los coeficientes de dosis revisados de los documentos ***OIR***. Los valores presentados en las tablas ***3.6*** a ***3.10*** son numéricamente iguales a los indicados en las tablas ***1*** a ***5*** de ***ISO 27048*** (*ISO 2011*).

Tabla 3-6: Valores de la magnitud crítica de vigilancia Mc para programas de vigilancia rutinaria correspondientes a 0,1 mSv/año: Medidas de orina

Radionucleido	Tipo de absorción	Intervalo máximo de tiempo (días)	M_c (Bq/24 h)
H-3	HTO	30	4000
C-14	Orgánico	7	10
C-14	Dióxido	180	300
P-32	F	30	10
P-33	F	30	100
S-35	F	7	20
Ni-63	M	15	3
Sr-89	F	30	10
Sr-89	S	30	0,05
Sr-90	F	30	1
Sr-90	S	180	0,003
Ra-226	M	180	1E-04
U natural (hexafluoruro)	F	90	0,01
U natural (peróxido, nitrato, diuranato amónico)	F	30	0,02
U natural (tetrafluoruro, trióxido)	M	90	0,003
U natural (dióxido, octóxido)	S	90	2E-05
Np-237	M	180	1E-04
Pu-238	S	180	7E-07
Pu-239	S	180	1E-06
Pu-239	M	180	1E-05
Am-241	M	180	3E-05
Cm-244	M	180	3E-05

Tabla 3-7: Valores de la magnitud crítica de vigilancia Mc para programas de vigilancia rutinaria correspondientes a 0,1 mSv/año: Medidas de heces

Radionucleido	Tipo de absorción	Intervalo máximo de tiempo (días)	M_c (Bq/24 h)
U natural (tetrafluoruro, trióxido)	M	180	2E-03
U natural (dióxido, octóxido)	S	180	9E-04
Th-228	S	180	2E-04
Th-232	S	180	5E-04
Th-232	M	180	2E-04
Np-237	M	180	7E-02
Pu-238	S	180	5E-04
Pu-239	S	180	7E-04
Pu-239	M	180	1E-04
Am-241	M	180	2E-04
Cm-244	M	180	4E-04

Tabla 3-8: Valores de la magnitud crítica de vigilancia Mc para programas de vigilancia rutinaria correspondientes a 0,1 mSv/año: Medidas de todo el cuerpo

Radionucleido	Tipo de absorción	Intervalo máximo de tiempo (días)	M_c (Bq)
Cr-51	F	15	20000
Mn-54	M	90	1000
Fe-59	M	90	400
Co-57	S	180	2000
Co-58	S	180	500
Co-60	S	180	100
Se-75	M	180	4000
Ag-110m	S	180	200
Cs-137	F	180	2000

Tabla 3-9: Valores de la magnitud crítica de vigilancia Mc para programas de vigilancia rutinaria correspondientes a 0,1 mSv/año: Medidas en pulmón

Radionucleido	Tipo de absorción	Intervalo máximo de tiempo (días)	M_c (Bq)
U natural (tetrafluoruro, trióxido)	M	180	0,6
U natural (dióxido, octóxido)	S	180	0,3
Am-241	M	180	0,04

Tabla 3-10: Valores de la magnitud crítica de vigilancia Mc para programas de vigilancia rutinaria correspondientes a 0,1 mSv/año: Medidas en tiroides

Radionucleido	Tipo de absorción	Intervalo máximo de tiempo (días)	M_c (Bq)
I-125	F	90	200
I-131	F	15	30

Según se puede observar de las tablas anteriores, los valores de M_c son superiores al límite de detección ***LD*** para productos de fisión y activación, mientras que son inferiores al ***LD*** para los actínidos considerados. Por tanto en el caso de los actínidos, cualquier valor de actividad medida daría como resultado una dosis anual mayor de ***0,1*** mSv que tendrá que ser evaluada. En el caso de los productos de fisión y activación, se pueden encontrar valores significativos de actividades medidas que resultan en dosis anuales inferiores a ***0,1*** mSv.

4. Tratamiento de los datos de las medidas

4.1 Obtención y tratamiento de datos antes de su utilización

4.1.1 Normalización de las medidas de actividad

Algunos tipos de medidas necesitan ser procesadas antes de poder ser utilizadas.

- ***Pulmones***. La actividad combinada de los pulmones y de los nódulos linfáticos es la que se asocia con la actividad en los "***pulmones***" que es a su vez la magnitud que calculan los programas de dosimetría interna. Cuando se calculen por separado la actividad de los pulmones y de los nódulos linfáticos, habrá que sumarlas. Las medidas en "***tórax***" pueden incluir también cuentas de la actividad de radionucleidos depositados en el hígado y en los huesos, y las contribuciones de estas actividades deberán restarse de la del tórax para determinar la actividad de los pulmones.
- ***Heces***. El tiempo de tránsito a través del tracto alimentario está sujeto a grandes variaciones inter e intra-individuos. Más aún, para facilitar el cálculo, el tránsito gastrointestinal está representado por una serie de compartimentos que decaen exponencialmente, aunque en la práctica, el movimiento gástrico se parece más al de una ***babosa*** o ***caracol***. Es por tanto muy improbable que la actividad diaria medida en heces de una persona durante los primeros días tras la incorporación siga las predicciones de los modelos, por lo que es mejor considerar la excreción acumulada durante los ***3 primeros días***, cuya incertidumbre asociada será menor que la de las actividades diarias.
- Las ***muestras de orina y heces*** recogidas en periodos ***menores de 24*** horas se deberán normalizar a los valores equivalentes ***para 24*** horas. EL proceso de normalización se logra multiplicando la actividad recogida en un periodo ***menor de 24*** horas por el cociente entre la masa o volumen de excreción referencia para 24 horas y la masa o volumen de la muestra. Las ***cantidades de referencia*** para ***excreción de 24 horas para hombres y mujeres*** respectivamente son las siguientes: ***para orina, 1,6 litros y 1,2 litros y para heces, 150 gramos y 120 gramos*** (*ICRP 2002a*). Para muestras de orina, otro método de normalización muy usado es con la cantidad de ***creatinina*** excretada por día; ***1,7 gramos y 1 gramo para hombres y mujeres respectivamente*** (ICRP *2002a*).
- Un caso crítico puede ocurrir cuando la muestra recogida durante ***24 horas*** es menor de ***500 ml*** para la ***orina*** y de ***60 gramos*** para las ***heces***. En estos casos habrá que suponer que la muestra no ha sido recogida sobre el periodo completo de ***24 horas*** por lo que habrá que normalizarla por volumen o masa.
- Un caso especial es la vigilancia de incorporaciones de ***agua tritiada***. En estos casos la recogida de ***muestras puntuales*** (spot) es suficiente porque se considera que el Tritio se distribuye uniformemente por todos los fluidos corporales.

4.1.2 Exposición a múltiples radionucleidos

En la mayoría de las situaciones, solo intervienen uno o unos pocos radionucleidos en la exposición y por tanto no es complicado establecer un programa apropiado de vigilancia para ellos. Sin embargo en algunas situaciones complejas o cuando intervienen elementos con varios isótopos de diferentes propiedades en cuanto a sus transformaciones nucleares (decaimiento), hay que ser cuidadoso a la hora de desarrollar un programa de vigilancia. Para el uranio y el plutonio se dan a continuación algunos ejemplos para ilustrar como enfocar esas exposiciones internas.

- ***Uranio***. Los datos de excreción (especialmente en heces) necesitarán ser corregidos en función del contenido de ***Uranio*** de la dieta (ver apartado 4.1.3 "***Sustracción del fondo debido a la dieta***"). También hay que calcular las dosis para los otros isótopos además de los que se hayan medido. Así por ejemplo, para el ***U enriquecido***, lo que se mide es el ***U-235***, mientras que la mayor dosis procede del ***U-234***. En el ***Anexo 1*** se dan composiciones isotópicas y actividades específicas para el ***Uranio natural, enriquecido y empobrecido***. De esas tablas se observa que la composición isotópica en términos de masa es completamente diferente de la de actividad. La composición isotópica del uranio natural y las actividades específicas de los diferentes isótopos del Uranio se dan en el apartado 14.1 del Anexo 1 Composiciones isotópicas del Uranio natural, enriquecido y empobrecido y de materiales con Plutonio que se encuentran en la industria nuclear.
- ***Plutonio y Americio***. Si la medida se expresa sencillamente como "***Pu***" sin más detalles, habrá que suponer que el dato se refiere a la actividad total alfa del plutonio (***Pu-238, Pu-239 y Pu-240***). Si la medida se expresa como ***Pu-239*** (sin más detalles) hay que suponer que el dato se refiere a ***Pu-239 + Pu-240*** puesto que ambos radionucleidos no se pueden separar por espectrometría alfa. Si no hay medida del ***Pu-241***, se supondrá por defecto la relación típica de su actividad respecto de la actividad total del ***Plutonio*** de las tablas ***6 a 11*** del Anexo 1 según corresponda. Sin embargo, hay una amplia variedad de diferentes características químicas y composición de los compuestos de ***Pu*** que se encuentran en la industria nuclear. Puesto que el ***Pu-241*** decae en ***Am-241*** con un periodo de ***14,32 años***, se podrá observar un incremento en la fracción de ***Am-241*** para el caso de una incorporación mixta de ***Plutonio*** y ***Americio***. Esta contribución del ***Am-241*** procedente del decaimiento del ***Pu-241*** deberá ser tenida en cuenta al interpretar los datos de bioensayo del ***Am-241*** (datos ***in-vivo*** y de ***excreción***).

4.1.3 Sustracción del fondo debido a la dieta

Los radionucleidos de las tres series naturales están presentes en todo el medio ambiente y por tanto están contenidos en los alimentos, agua de bebida y en el aire, dando lugar a exposiciones internas en la población humana.

La ***Publicación 23*** de ***ICRP*** sobre el ***Hombre de Referencia*** ofrece datos de las incorporaciones y excreciones diarias para los diferentes elementos. Para el ***Uranio***, las excreciones diarias oscilan entre ***0,05 – 0,5 μg*** (***1,25 – 12,5 mBq***) en ***orina*** y de ***1,4 a 1,8 μg*** (***35 – 45 mBq***) en ***heces***. Para el ***Torio***, estas excreciones son de

0,1 μg (***0,4 mBq***) en ***orina*** y ***2,9 μg*** (***12 mBq***) en ***heces***. Para el ***Radio*** las excreciones son de ***3 mBq*** en ***orina*** y ***80 mBq*** en ***heces***.

Según se indica en las ***Tablas 4.1*** y ***4.2***, existe una gran variedad de concentraciones de actividad en diferentes áreas del mundo con valores excepcionalmente altos para el uranio en Finlandia. (Los cálculos de las tablas se han hecho a efectos de homogeneidad y comparación, suponiendo una ***excreción urinaria diaria de 1,6 litros*** (*ICRP 2002a*) y que el ***peso de las cenizas de las heces es de 4 gramos diarios***)

Tabla 4-1: Concentraciones de fondo de actividad de Uranio en orina

U-234 (mBq/d)		U-238 (mBq/d)		Comentarios	Referencia
Media	Rango	Media	Rango		
1,41	0,25 - 2,5	1,30	0,17 – 2,6	Sujetos de control en USA	Fisher 1983
0,89		0,52		Estudio de dietas en el RU	Spencer 1990
		0,46		Voluntarios no expuestos en USA	Wrenn 1992
		0,26		Fondo ambiental normal, India	Dang 1992
0,23	0,056 – 2,7	0,20	0,051–0,94	Trabajador potencialmente expuesto, Mol , Bélgica	Hurgten 2001
		8437	20-112000	Población del sur de Finlandia	Kurttio 2001
		3,95	0,23 - 15,2	Sujetos no expuestos, Jordania	AL-Jundi 2004
0,46	0 – 2,5	0,41	0 – 3.0	Sin exposición al U en Dounreay, RU	Sepencer2007
		0,17	0,037-0,29	Sujetos no expuestos del sur de Dinamarca	Oeh 2007
		0,17	0,032-0,44	Población general de Checoslovaquia	Malatova 2011
		0,53	0,19 – 1,26	U en la familia de un trabajador en Checoslovaquia	Malatova 2011

Para el U-238, los datos dados en masa han sido recalculados y expresados en mBq/d. La excreción urinaria diaria se ha supuesto igual a 1,6 litros día (ICRP-89 (2002))

Tabla 4-2: Concentraciones de fondo de actividad de Uranio en heces

U-234 (mBq/d)		U-238 (mBq/d)		Comentarios	Referencia
Media	Rango	Media	Rango		
37		26		Estudio de dietas en USA	Spencer 1990
		17,4	5 – 27	Habitantes de Berlín (Alemania)	Naumann 1998
14	9,2 – 19,2	13,5	8 -18	Poços de Caldas, Brasil	Taddei 2001
32	7,3 - 225	22	3,8 - 170	Trabajador potencialmente expuesto, Mol , Bélgica	Hurtgen 2001
46		47		Buena, Brasil	Juliao 2003
32		28,5		Rio de Janeiro, Brasil	Juliao 2003

Tabla 4-3: Concentraciones de fondo de actividad de Torio en orina

Th-228 (mBq/d)		Th-230 (mBq/d)		Th-232 (mBq/d)		Comentarios	Referencia
Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango		
				0,03		Fondo natural, Alemania	Dalheimer 1994
				2,1		Excreción diaria en Buena, Brasil	Juliao 1998
0,63	0,19 – 2,6	0,53	0,11 – 3,7	0,23	0,11 – 0,50	Trabajador no expuesto al Th, Bélgica	Hurtgen 2001
				0,007		Adulto no expuesto, Alemania	Rotj 2005

Tabla 4-4: Concentraciones de fondo de actividad de Torio en heces

Th-228 (mBq/d)		Th-230 (mBq/d)		Th-232 (mBq/d)		Comentarios	Referencia
Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango		
				12		Fondo natural, Alemania	Dalheimer 1994
23	11 - 39	9,8	1,7 - 16	5,4	1,6 - 12	Habitantes de Berlín, Alemania	Naumann 1998
				30	5,6 - 104	Excreción diaria en Buena, Brasil	Juliao 1998
35	5,8 - 161	7,7	1,87 - 31	3,4	0,97 – 22	Trabajador no expuesto al Th, Bélgica	Hurtgen 2001
290	218 - 442	12,4	7,5 - 17,5	7,4	4,5 - 12	Poços de Caldas, Brasil	Taddei 2001
947				26		Habitantes de Buena, Brasil	Juliao 2003
60				10		Habitantes de Rio de Janeiro, Brasil	Juliao 2003
		4,1	1 - 34			Población en general, Alemania	Schäfer 2006

Tabla 4-5: Concentraciones de fondo de actividad de Radio en orina y heces

Ra-226 (mBq/d)				Comentarios	Referencia
Excreción urinaria		Excreción fecal			
Media	Rango	Media	Rango		
0,6	0,22 – 1,22	29	20 – 43	Paciente masculino (USA)	Spencer 1973
		65	38 – 212	Habitante de Berlín	Naumann 1998
3,8	0,47 – 18,5	109	36 – 240	Trabajador no expuesto, Bélgica	Hurtgen 2001
		581		Habitantes de Buena, Brasil	Juliao 2003
		71		Habitantes de Rio de Janeiro, Brasil	Juliao 2003
9,9	0,6 - 29	66	6 – 212	Población en general, Alemania	Schäfer 2004
8,1	2 - 75	21	2 - 442	Población en general, Alemania	Schäfer 2006

Es absolutamente necesario disponer de información sobre la actividad del fondo natural que se puede encontrar en muestras de bioensayos si se quiere con ellas determinar incorporaciones ocupacionales. Para ello será necesario obtener muestras blanco antes de iniciar el trabajo efectivo en zonas potencialmente contaminadas. De esta forma será posible distinguir entre incorporaciones naturales o no ocupacionales de las ocupacionales.

Estas muestras de bioensayo se pueden obtener del trabajador antes o al principio de su vida laboral, de trabajadores no expuestos o de la población que viva en la zona incluyendo algunos familiares del trabajador. De forma alternativa y durante la evaluación de la incorporación ocupacional y para tener en cuenta la radiactividad natural contenida en los alimentos o en el agua de bebida, se ha de suponer una incorporación crónica por ingestión durante todo el periodo de la exposición ocupacional.

Tabla 4-6: Concentraciones de fondo de actividad de Polonio en orina y heces

Po-210 (mBq/d)				Comentarios	Referencia
Excreción urinaria		Excreción fecal			
Media	Rango	Media	Rango		
0,41				No fumador	Radford 1964
2,4				Fumador	Radford 1964
2,2	0,26 – 9,3			Paciente adulto de hospital	Taylor 1964
13,6				-	Hölgye 1969
5	3,3 – 9,1			-	De Boeck 1971
1,4				Muestra conjunta	Bale 1975
25	7,1 - 62			No fumadores	Okabayashi 1975
66	33 – 118			Fumadores	Okabayashi 1975
14	7,4 - 27	236	63 - 938	Un individuo no fumador	Okabayashi 1975
9,3	1,85 – 18,9	64	48 - 73	Adultos masculinos	Spencer 1977
1,78				-	Helmkamp 1979
41				Trabajadores excepto mineros del Uranio	Okabayashi 1982
26				Individuos locales de control (zona minera)	Fenzi 1986
12,4				Área de Milán (Italia)	Fenzi 1986
5,2				No fumadores	Azeredo 1991
9,9				Fumadores	Azeredo 1991
8,3	4,6 – 11			No fumadores	Santos 1994
15,7	11 – 24			Fumadores	Santos 1994
8,5	6,4 – 10,4			Granjeros	Santos 1995
6	2(LD) – 9,9			Personas de Berlín (Alemania)	Naumann 1998
12	2 – 35	45	16 - 85	14 voluntarios caucásicos	Thomas 2001
5,2				No fumadores	Lipsztein 2003
9,9				Fumadores	Lipsztein 2003
		514	240 - 890	Estudio del tracto alimentario (5 voluntarios)	Hunt 2004
9,4	2,4 – 16			No fumadores	Al-Arifi 2006
14,2	5,3 – 25			Fumadores	Al-Arifi 2006
13	3,5 – 31			Fumadores de shiha	Al-Arifi 2006
3,5	1,0 – 248*			Población en general	Schäfer 2006
56	16 - 172	239	32 - 936	Estudio del tracto alimentario (7 voluntarios)	Hunt 2007

*Valor máximo teniendo en cuenta a los trabajadores

4.2 Evaluación de incertidumbres

Es de gran importancia la evaluación de la incertidumbre de los datos por las siguientes razones:

- Permiten tomar una ***decisión objetiva*** respecto a cualquier valor medido con respecto a si se debe a una nueva incorporación o es debido a incorporaciones previas que ya han sido evaluadas.
- Permiten tomar una ***decisión objetiva*** respecto a si cualquier valor medido es consistente con evaluaciones previas o indica que las evaluaciones previas eran incorrectas.
- Pueden tener una gran influencia en todas aquellas evaluaciones que hacen uso de ***procedimientos ponderados de ajuste*** (por ejemplo, cuando hay más de un valor)
- Permiten identificar objetivamente datos sospechosos o anómalos
- Permiten construir criterios (***bondad del ajuste***) objetivos (***estadísticos***) que son de utilidad para determinar si las predicciones del modelo biocinético (para un conjunto dado de valores de sus parámetros) utilizado en la evaluación de la incorporación y la dosis, son inconsistentes con los datos medidos.
- Permiten calcular estimadores estadísticos como el ***chi-cuadrado*** (χ^2) que se utilizan para comparar ajustes de diferentes modelos/valores de parámetros con los datos medidos.

Las publicaciones del ***OIEA Safety Series 114*** (*IAEA 1996*) ***y Safety Report Series No. 37*** *(IAEA 2004*) tratan las incertidumbres de las medidas de cuerpo entero y de muestras biológicas. No existen procedimientos estandarizados para la determinación de las incertidumbres en las medidas directas o indirectas de bioensayo. Todos los procedimientos utilizados en la determinación de la actividad de un radionucleido son fuentes de incertidumbres aleatorias y sistemáticas. Las incertidumbres de las medidas proceden en general de la estadística del contaje, de la validez del procedimiento de calibración, posible contaminación de la muestra o del sistema de medida y de las fluctuaciones estadísticas del fondo.

Para estimar la incertidumbre total de una medida es necesario considerar cada fuente de incertidumbre y tratarla de forma separada para obtener la contribución de cada fuente. Cada una de las contribuciones independientes o separadas de la incertidumbre se denomina componente de la incertidumbre.

Los componentes de la incertidumbre de una magnitud se dividen en dos categorías principales denominadas incertidumbres de ***Tipo A*** y de ***Tipo B***. La ***Guía ISO*** para la ***Expresión de la Incertidumbre en la Medida*** (*BIPM et al., 2010*) discrimina entre la evaluación de la incertidumbre de ***Tipo A*** – aquella basada únicamente en conceptos estadísticos – y la evaluación de la incertidumbre de ***Tipo B*** – aquella basada en conceptos no estadísticos. Sin embargo, como se indica en la publicación del Laboratorio Nacional de Física del Reino Unido (*Cox and Harris, 2004*), a veces es más útil hacer una distinción entre efectos que pueden ser considerados como aleatorios y aquellos otros que pueden considerarse como sistemáticos. Cox y Harris indican que la subdivisión entre las evaluaciones de incertidumbres de ***Tipo A*** y de ***Tipo B*** se corresponden en algunas circunstancias con los efectos aleatorios y sistemáticos respectivamente pero no en todas las circunstancias.

En el caso de la medida de actividad en el cuerpo o en una muestra biológica, las incertidumbres de ***Tipo A*** proceden únicamente de la ***estadística del contaje*** que puede describirse por la distribución de ***Poisson***, mientras que las incertidumbres de ***Tipo B*** incluyen el ***resto de fuentes de incertidumbre***.

Ejemplos de incertidumbres de ***Tipo B*** para muestras ***in-vitro*** son el volumen o peso de la muestra, errores de dilución o pipeteo, evaporación de la muestra durante su almacenamiento, estabilidad y actividad de los patrones de calibración, contribuciones del fondo en la actividad excretada, similitud en los rendimientos químicos entre el trazador y el radionúclido de interés, correcciones del blanco, estabilidad electrónica, resolución espectroscópica y solapamiento de picos, contaminación de la muestra e impurezas, posición de la muestra durante el contaje, densidad y suposiciones de homogeneidad en la calibración (*Skrable et al., 1994*). Todas estas incertidumbres se dan en mayor o menor medida en la determinación de la actividad de la muestra. Con las muestras de excretas, la actividad de la muestra se emplea para estimar la actividad promedio excretada en ***24 horas*** para su comparación con las predicciones del modelo biocinético. Si las muestras se recogen en ***periodos menores de 24*** horas habrá que normalizarlas a su valor equivalente para ***24 horas***. Y ello introduce nuevas fuentes de incertidumbre de ***Tipo B***: incertidumbres en el periodo de recogida, que depende del procedimiento de muestreo y de la técnica para calcular el periodo de recogida e incertidumbres asociadas a la variabilidad biológica intra e inter-individuos. Estas incertidumbres pueden ser mayores que la asociada con la medida de actividad de la muestra.

Las medidas directas o ***in-vivo*** se pueden hacer en diferentes geometrías (todo el cuerpo, pulmones, tiroides, esqueleto, hígado, herida, etc.). Cada tipo de geometría necesita un sistema de detección específico y procedimientos de calibración. Las publicaciones del ***OIEA Safety Series 114*** (*IAEA 1996*) e ***ICRU-69*** (*ICRU 2003*) analizan las medidas directas de bioensayo e incluyen apartados dedicados a sensibilidad y exactitud de las medidas.

Ejemplos de incertidumbres de ***Tipo B*** para medidas ***in-vivo*** incluyen errores de geometría en el contaje, posición del individuo en relación con el detector y la geometría de calibración, movimiento de la persona durante el contaje, espesor de la pared torácica, diferencias entre el maniquí y la persona, densidad, distribución de la fuente dentro del organismo, resolución espectroscópica y solapamiento de picos, estabilidad electrónica, interferencias de otros radionucleidos, actividad de los patrones de calibración, contaminación superficial de la persona, interferencias de elementos radiactivos naturales del organismo e incertidumbres de la fuente de calibración (*IAEA 1996*, *Skrable et al., 1994*).

Para medidas parciales del organismo es generalmente difícil interpretar los resultados en términos de actividad en un órgano específico porque también se puede detectar la radiación procedente de otros órganos del cuerpo. La interpretación de esas medidas puede requerir suposiciones relacionadas con la biocinética del radionucleido y con la progenie radiactiva generada *in vivo*. La publicación de la IAEA "***Safety Report on Direct Methods for Measuring Radionuclides in the Human Body***" (*IAEA 1996*) ilustra un caso semejante utilizando Am-241. Una suposición fundamental realizada en la calibración de un sistema de medida de pulmones es que el depósito de la actividad en los pulmones es homogéneo cuando raras veces lo es.

Las incertidumbres de medida asociadas con la estadística del contaje (incertidumbres de ***Tipo A***) decrecen al aumentar la actividad o el tiempo de contaje, mientras que las incertidumbres de ***Tipo B*** son en gran medida independientes de la actividad o del tiempo de contaje. Por tanto cuando los niveles de actividad son pequeños y cercanos al límite de detección, la incertidumbre total estará dominada frecuentemente por el componente de ***Tipo A*** (***estadística del contaje***). Para radionúclidos de fácil detección y presentes en suficiente magnitud, la incertidumbre total estará dominada por los componentes de ***Tipo B*** (***incertidumbres distintas a las asociadas a la estadística del contaje***).

En esta ***Guía*** por simplicidad se supone que la incertidumbre asociada a un resultado de actividad medida de exposición interna (***in-vivo*** o ***in-vitro***) se puede describir por una distribución ***logarítmico-normal*** con ***factor de dispersión*** (***SF***) definido por su ***desviación geométrica estándar***. Este enfoque es razonable cuando las incertidumbres de ***Tipo A*** son relativamente pequeñas. Sin embargo, en casos en los que el recuento es bajo (p.e. cuando los errores de ***Tipo A*** son grandes) Miller et al. (*2002*) consideran que debe utilizarse la función exacta de probabilidad que ellos describen. Esta función que da la distribución de probabilidad de las medidas dada una incorporación, describe las incertidumbres debidas a la estadística de contaje (errores de ***Tipo A***) con una distribución de Poisson mientras que todas las demás incertidumbres (***Tipo B***) están descritas por una única distribución log-normal

La ***Tabla 4.7*** lista valores típicos de los diversos componentes de la incertidumbre para medidas directas ***in-vivo*** (*Doerfel 2006*)**.** La incertidumbre está expresada en términos de factores de dispersión (***scattering factors SF***) suponiendo que la distribución de la medida puede ser descrita por una distribución log-normal. Por ejemplo, el ***SF*** debido a la estadística del contaje para fotones de alta energía es SF_A **= 1,07**. Esto significa que la dispersión de los valores medidos debido a la estadística del contaje hará que el ***68%*** de ellos caigan en el rango entre $X_{50}/1{,}07$ y $1{,}07X_{50}$, siendo X_{50} la mediana de los valores medidos.

En base a la experiencia obtenida en el proyecto de la ***Guía IDEAS*** (Castellani 2004) y a efectos prácticos y de simplicidad, se utiliza la siguiente expresión para el cálculo de la incertidumbre total:

$$SF = exp\left[\sqrt{\sum_i ln^2(SF_i)}\right] \quad (4.1)$$

Con ***SF = Factor de dispersión total*** y SF_i ***= Factor de dispersión debido al componente i***.

Cuando se aplica la formula anterior a los valores de los ***SF*** de la ***Tabla 4.7*** se obtienen los factores totales de dispersión ***SF*** de la ***Tabla 4.8***. Sin embargo *Miller, 2007*, ha apuntado que la suposición de que la incertidumbre total de un valor de una vigilancia individual puede ser descrita por una distribución log-normal es razonable si el cociente $Ln(SF_A)/Ln(SF_B)$ es menor de ***1/3***.

Los valores de ***SF*** indicados en las ***Tablas 4.7*** y ***4.8*** son aplicables a medidas ***in-vivo*** de pulmones, tórax y cuerpo entero. Medidas ***in-vivo*** muy especializadas como las de rodilla o cráneo para determinar la actividad en huesos pueden tener incertidumbres más grandes que las de las medidas de actividad de todo el cuerpo.

Tabla 4-7: Valores típicos para los componentes de la incertidumbre log-normal para medidas *in-vivo* de radionucleidos emisores gamma de baja, intermedia y alta energía

Fuente de incertidumbre (Tipo)	Factor de dispersión *SF*		
	Fotones de baja energía E < 20 keV	**Fotones de energía intermedia 20 keV < E ≤ 100 keV**	**Fotones de alta energía E > 100 keV**
Estadística del contaje (***A***)	1,5	1,3	1,07
Variación en la posición del detector (***B***)	1,2	1,05	< 1,05
Variación en la señal de fondo (***B***)	1,5	1,1	< 1,05
Variación en las dimensiones del cuerpo (***B***)	1,5	1,12	1,07
Variación debido a las capas de tejido envolvente (***B***)	1,3	1,15	1,12
Variación en la distribución de la actividad (***B***)	1,3	1,05	< 1,05
Calibración (***B***)	1,05	1,05	1,05
Evaluación del espectro[(a)] (***B***)	1,15	1,05	1,03

[(a)] Espectros de detectores HpGe

Tabla 4-8: Valores típicos para las incertidumbres log-normal de Tipo *A* y *B* para medidas *in-vivo* de radionucleidos emisores gamma de baja, intermedia y alta energía

Fuente de incertidumbre (Tipo)	Factor de dispersión *SF*		
	Fotones de baja energía E < 20 keV	**Fotones de energía intermedia 20 keV < E ≤ 100 keV**	**Fotones de alta energía E > 100 keV**
Total ***Tipo A***	1,5	1,3	1,07
Total ***Tipo B***	2,06	1,25	1,15
Total	2,3	1,4	1,2

Tratamientos específicos, como las medidas de actínidos en cráneo o rodilla, necesitan una estimación cuidadosa de SF_B. Las estimaciones generales de ***SF*** no son robustas porque los valores particulares dependen fuertemente de la geometría de medida y de las propiedades del sistema de detección. Por ello se requiere un análisis apropiado de las incertidumbres. Malátová y Foltánová (*Malátová 2000*) han publicado una estimación básica basada en suposiciones generales para una geometría simple de dos detectores enfrentados a los huesos temporales. Análisis detallados para la misma geometría basados en los mejores datos disponibles y en una calibración Monte Carlo han sido publicados por Vrba (Vrba 2010). La incertidumbre total se estimó con dos métodos: el primer método combinaba las incertidumbres como se describe aquí y el segundo aplicaba el método de Monte Carlo. La ***Tabla 4.9*** presenta valores de las incertidumbres de ***Tipo B*** para medidas de ***Am-241*** en cráneo basados en las publicaciones citadas anteriormente.

Tabla 4-9: Valores propuestos para las incertidumbres de Tipo *B* para evaluación de la actividad de Am-241 en huesos

Fuente de incertidumbre	SF_B
Calibración del maniquí	1,06
Posición del detector	1,13
Dependencia del tamaño de la cabeza	1,24
Distribución de actividad	1,11*
Análisis del espectro	1,08
Total	**1,33**

*Posiblemente debido a la diferencia en la distribución de la fuente entre el sujeto y el maniquí de calibración

En los modelos biocinéticos se requiere conocer la actividad de todo el esqueleto, por tanto la incertidumbre asociada a una medida en cráneo cuyo $SF_B = 1,16$ debe tenerse en cuenta al extrapolar la actividad total en el esqueleto. Por ello la incertidumbre total de la actividad de ***Am-241*** en ***esqueleto*** a partir de medidas en ***cráneo*** debe evaluarse con una incertidumbre de $SF_B = 1,38$.

La actividad medida ***M*** y su incertidumbre de ***Tipo A***, σ_A vienen dadas en función de otras magnitudes medidas:

$$M = C_{rn}\left(\frac{N_G}{T_S} - \frac{N_B}{T_B}\right) = \frac{C_{rn}}{T_S}\left(N_G - \frac{N_B}{R_B}\right) \qquad (4.2)$$

$$\sigma_A = \frac{C_{rn}}{T_S}\sqrt{N_G + \frac{N_B}{R_B^2}} \qquad (4.3)$$

Donde, N_G es el número de cuentas de la muestra, N_B es el número de cuentas del fondo, R_B es el cociente entre el tiempo de medida del fondo y el de la muestra, $R_B = T_B/T_S$ y C_{rn} es el ***factor de normalización*** que permite pasar de tasa de cuentas (***cps***) a actividad (***Bq por cps***). En C_{rn} está incluida la ***eficiencia***.

Si ***M*** es conocida, de la ecuación ***4.2*** se puede determinar N_G si también se conoce C_{rn}, T_S, N_B y R_B por lo que la incertidumbre de ***Tipo A***, σ_A se puede determinar entonces de la ecuación ***4.3***.

El factor de dispersión ***SF*** para la incertidumbre de ***Tipo A*** vendrá dado por:

$$SF_A = exp\left[\frac{\sigma_A}{M}\right] \qquad (4.4)$$

Y el factor de dispersión ***SF*** para la incertidumbre de ***Tipo B*** vendrá dado por:

$$SF_B = exp\left[\frac{\sigma_{C_{rn}}}{C_{rn}}\right] \qquad (4.5)$$

Donde $\sigma_{C_{rn}}$ es la incertidumbre del factor de normalización

La ***Tabla 4.10*** presenta valores típicos de factores de dispersión ***SF*** de ***Tipo B*** para medidas in-vitro. En la práctica, los datos rutinarios de excreción urinaria de trabajadores con Plutonio, suelen tener una distribución log-normal con un ***SF*** que varía entre 1,3 y 2,4 (*Moss et al. 1969; Riddell et al. 1994; Miller et al. 2007 y Marsh et al. 2007, 2008*). Sin embargo, Moss et al. (*1969*) han mostrado que cuando el método de

muestreo y los procedimientos analíticos están cuidadosamente controlados para muestras de orina verdaderas de 24 horas a lo largo de 5 días, el valor de ***SF*** es significativamente menor (***1,1***). Esto está en concordancia con los valores de ***SF*** obtenidos en experimentos con voluntarios cuando los procedimientos de muestreo estuvieron cuidadosamente controlados (*Marsh et al. 2007*). Ello muestra que para los datos de excreción rutinaria de orina, la incertidumbre asociada con el desconocimiento del periodo de recolección es la principal fuente de incertidumbre.

Se han evaluado los factores de dispersión procedentes de datos de vigilancia de orina cuando las muestras se han promediado (*Marsh et al. 2007*). Se han calculado factores de dispersión de 1,7, 1,7 y 1,4 de tres casos de inhalación de Uranio en los que los datos de orina consistían principalmente en un promedio de 2 a 6 muestras de orina.

Para incorporaciones de agua tritiada (***HTO***) se utiliza la concentración de actividad en orina y no la tasa de excreción de 24 horas. Como resultado de ello, SF_B es menor (***1,1***).

Marsh et al. 2007 han calculado valores de ***SF*** para vigilancia fecal usando datos reales de la Base de Datos de Contaminación Interna de ***IDEAS*** (*Hurtgen et al. 2007*). Se evaluaron 10 casos de incorporaciones con Plutonio y Americio y los valores de ***SF*** variaron entre 1,9 y 3,5 para los casos individuales. Combinando estos casos se obtiene un ***SF*** global de 2,7. Bull (*2005*) ha determinado valores de ***SF*** entre 2 y 3 para excreciones fecales sistémicas de datos de voluntarios, que están en concordancia con los valores calculados por Marsh et al. 2007. Los factores de dispersión de datos de excreciones fecales de 24 horas estimados por Juliao et al. 2007 para U-234 son también consistentes con estos valores.

Tabla 4-10: Valores típicos del factor de dispersión *SF* para varios tipos de medidas *in-vitro* procedentes de diferentes estudios (incertidumbres *Tipo B*). Entre paréntesis se muestras los rangos

Magnitud	SF_B
Muestra verdadera de orina de 24 h	1,1[(a)]
Concentración de actividad de H-3 en orina (HTO)	1,1[(b)]
Muestra simulada de orina de 24 h, normalizada por creatinina, volumen o gravedad específica	1,6[(b)] (1,3[(c)] – 1,8[(d)])
Muestra puntual de orina[(e)]	2[(a)]
Muestra de heces de 24 h	3 (2 – 4)[(b)]
Muestra de heces de 72 h	2 (1,5 – 2,2)[(f)]

(a) Valores proporcionados por Moss et al. 1969 basados en medidas de orina de Plutonio de trabajadores de Los Alamos.

(b) Valores basados en el juicio de expertos y en los valores calculados por Marsh et al. (*2007, 2008*)

(c) En Los Alamos se ha encontrado que las incertidumbres de ***Tipo B*** en términos del coeficiente de variación para muestras de orina normalizadas por volumen y gravedad específica son del 30% (es decir, un ***SF*** de ***1,3***).

(d) Valores proporcionados por Riddell et al., 1994 basados en medidas en orina de Plutonio de trabajadores de Sellafield. Puesto que los procedimientos de muestreo y las técnicas de medida han mejorado a lo largo de los años, es muy probable que las medidas recientes tengan un ***SF*** menor que ***1,8***.

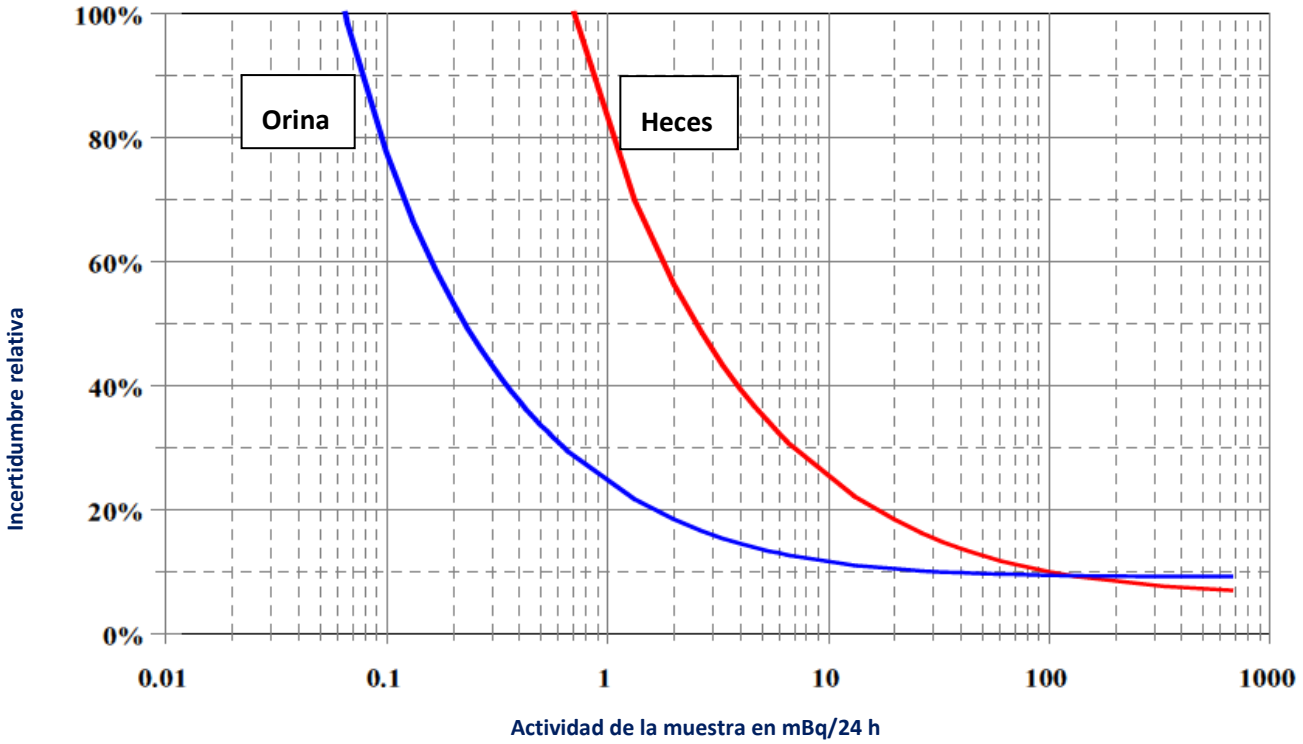
(e) Una muestra puntual de orina es una micción que se utiliza para estimar por normalización una muestra de orina 24 horas.

(f) Los valores de ***SF*** para muestras fecales de 72 horas se calcularon a partir de valores de ***SF*** para muestras fecales de 24 horas.

Hurtgen (*2003*) ha calculado incertidumbres de ***Tipo A*** para medidas de orina y heces por espectrometría alfa de actínidos en función de la actividad suponiendo condiciones analíticas óptimas.

Para conveniencia del lector, la ***Figura 4.1*** presenta la incertidumbre relativa en función de la actividad en orina y heces en condiciones analíticas óptimas. El gráfico muestra principalmente incertidumbres de ***Tipo A*** para actividades menores de ***100 mBq***.

Figura 4-1: Incertidumbre relativa (%) en función de la actividad de la muestra (mBq por 24h) de orina y heces en condiciones analíticas óptimas (*Hurtgen y Cossonnet, 2003*)



Para casos con datos completos de alta calidad es posible determinar los valores de ***SF*** utilizando el enfoque descrito por Marsh (*Marsh 2007*). En este enfoque, la tendencia de los datos se determina ajustando los datos a una suma de exponenciales suponiendo que los errores se distribuyen de forma log-normal. Los valores de ***SF*** se determinan calculando la desviación geométrica estándar de los datos alrededor de la tendencia.

5. Interpretación de los resultados de las medidas

5.1 Introducción

Las medidas de bioensayo directas e indirectas ofrecen información sobre la actividad de los diferentes radionucleidos presentes en todo el organismo, en órganos específicos o en muestras biológicas. Para este mismo fin se han elaborado los modelos metabólicos de ***ICRP*** que dan cuenta de la actividad en todo el cuerpo o en órganos específicos o en muestras de excreta por unidad de actividad incorporada, en definitiva, lo que se conoce como las funciones de retención y de excreción. Estos modelos metabólicos de ***ICRP*** permiten calcular valores por unidad de incorporación para estas magnitudes a medir ***m(t)***, un tiempo ***t*** después de la incorporación. Hasta que ***ICRP*** no actualice los modelos metabólicos en sus próximas publicaciones ***OIR***, se utilizarán los de la ***Publicación 78 de ICRP*** *(ICRP 1997)* y/o los de la ***Publicación 37 del OIEA*** (*IAEA 2004*) de la colección ***Safety Reports Series***, que son los mismos. Conocida la incorporación, la ***dosis efectiva comprometida*** en ***Bq*** se calcula multiplicando la incorporación por el ***coeficiente de dosis en Sv/Bq***. Alternativamente, se pueden utilizar las medidas en todo el cuerpo para estimar directamente las tasas de dosis si se dispone de un número suficiente de medidas para determinar las funciones de retención. Este método de evaluación directa de la dosis se puede usar para las incorporaciones de agua tritiada según se describe en el apartado 12 (*IAEA, 2004, Hurtgen et al. 2005, IAEA, 2007*)

Cuando se dispone de una única medida, se realiza una estimación puntual de la incorporación y cuando se dispone de múltiples medidas, se puede realizar una mejor estimación de la incorporación aplicando un método estadístico de ajuste de datos.

5.2 Medidas únicas, incorporaciones únicas

Vigilancia especial

Cuando se conoce el momento de la incorporación para vigilancias especiales o asociadas a algún trabajo en particular, la incorporación se puede estimar relacionando las medidas obtenidas con los correspondientes valores ***m(t)*** de las funciones de retención y/o excreción un momento ***t*** después de la incorporación. Si solo se dispone de una única medida, la incorporación ***I*** se obtiene de la magnitud medida ***M*** de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{I\ (Bq) = \frac{M\ (Bq)}{m(t)}} \qquad (5.1)$$

Hay que tener cuidado para asegurar que el resultado de la medida ***M*** y ***m(t)*** sean comparables; por ejemplo, en el caso de análisis de orina el resultado debe expresarse como la actividad total de una muestra de orina de 24 horas al final del periodo de recogida (no del análisis),

La ***incorporación I*** se multiplica por el ***coeficiente de dosis en Sv/Bq*** para obtener la ***dosis efectiva comprometida*** que después se compara con los límites de dosis o con algún nivel de investigación predeterminado también en términos de dosis. Si la medida indica que se ha superado un nivel de investigación, habrá que realizar una investigación del incidente.

Vigilancia rutinaria

En vigilancias rutinarias será necesario estimar la incorporación a través de una medida realizada al final del periodo o intervalo de vigilancia. Cuando el momento de la incorporación no es conocido y no se puede deducir de las condiciones de trabajo o de la información proporcionada por los trabajadores, se supondrá que la incorporación tuvo lugar en el punto medio del periodo o intervalo de vigilancia. Si este intervalo de vigilancia es de ***T*** días y la actividad medida al final de este intervalo es ***M***, entonces la incorporación será:

$$\boldsymbol{I\ (Bq) = \frac{M\ (Bq)}{m(T/2)}} \qquad (5.2)$$

Siendo ***m(T/2)*** el valor de la función de ***retención*** (***excreción***) ***T/2*** días después de la incorporación, correspondiente al punto medio del intervalo de vigilancia.

Una incorporación anterior puede influenciar el resultado de la medida actual. Para una única medida o una serie de ellas de un programa rutinario de vigilancia, se puede seguir el siguiente procedimiento:

- Determinar la magnitud de la incorporación previa
- Predecir la contribución de esta incorporación previa en el resto de medidas posteriores
- Restar estas contribuciones del resto de medidas correspondientes afectadas
- Repetir este procedimiento para el siguiente intervalo de vigilancia

Siguiendo ***ISO 27048*** (*ISO 2011*) y esta ***Guía IDEAS*** (***Apartado 7.3***), se sugiere utilizar la incertidumbre de la medida (el ***factor SF***) para determinar si el resultado de una medida es debido a una nueva incorporación o lo es de una incorporación anterior ya evaluada.

La dosis de esta incorporación se determina como antes multiplicando el coeficiente dosis en ***Sv/Bq*** por la magnitud de la incorporación y esta dosis efectiva comprometida se puede comparar con la fracción del límite de dosis que se corresponde con la duración del intervalo de vigilancia o con algún nivel de investigación predeterminado en términos de dosis. Si la medida indica que se ha superado el nivel de investigación, se iniciará una vigilancia especial para evaluar con más exactitud tanto la incorporación como la dosis asociada (***Apartado 7.5***).

5.3 Múltiples medidas

Los resultados de un programa especial de vigilancia de una persona lo componen varias medidas realizadas en diferentes momentos (tiempos) y procedentes de una o más técnicas de vigilancia (por ejemplo de medidas directas e indirectas).

Para determinar la mejor estimación de una incorporación única cuando se conoce el momento de la incorporación, es preciso calcular los valores $\boldsymbol{m(t_i)}$ de las funciones de retención/excreción para los mismos tiempos $\boldsymbol{t_i}$ en los que se han obtenido las medidas experimentales correspondientes. Se requiere entonces realizar la mejor estimación $\boldsymbol{I}$ de la incorporación de forma que los productos $\boldsymbol{I \times m(t_i)}$ se ajusten lo mejor posible con las medidas $\boldsymbol{M_i}$ obtenidas. En el caso de que se disponga de una serie de medidas obtenidas de más de una técnica de bioensayo, se recomienda que la estimación de la incorporación y dosis se haga ajustando simultáneamente los valores de las funciones de retención y/o excreción con todos los resultados de los diferentes tipos de medidas. Por ejemplo, si se dispone de datos de actividad de orina y heces, la incorporación se evaluará ajustando a la vez los valores de las funciones de excreción de orina y de heces con los datos experimentales medidos.

Existen numerosos métodos estadísticos para el ajuste de datos (*IAEA, 2004*). Los dos métodos más ampliamente utilizados son el de la máxima probabilidad y la técnica Bayesiana. Se puede justificar el uso de otros métodos como el de mínimos cuadrados y la media geométrica de las estimaciones puntuales sobre la base del método de la máxima probabilidad para ciertas suposiciones sobre el error asociado con los datos. Por ejemplo, el método de mínimos cuadrados se puede deducir del método de la máxima probabilidad si se supone que la incertidumbre de todos los datos está caracterizada por una distribución normal. La distribución asumida (p.e, normal o log-normal) puede tener una dramática influencia en la incorporación y dosis evaluadas si el modelo supone un ajuste pobre de los datos. Sin embargo, en tanto en cuanto el ajuste del modelo a los datos mejore, la influencia de las incertidumbres de los datos sobre la incorporación y dosis evaluadas se va reduciendo (*Marsh el al. 2007*)

A continuación se dan unas ecuaciones sencillas para estimar la incorporación cuando se dispone de varias medidas, que están basadas en el método de la máxima probabilidad suponiendo que los datos se pueden caracterizar por una distribución ***log-normal*** con un valor dado de ***SF***.

Método de la máxima probabilidad

La función de probabilidad es la función de densidad de probabilidad de observar el dato de la medida dada la incorporación y los valores de los parámetros del modelo. El "***mejor ajuste***" del valor de la incorporación $\boldsymbol{I}$ es la incorporación para la cual la función de probabilidad es máxima. Suponiendo que la distribución de probabilidad de las medidas se puede aproximar por una distribución ***log-normal*** con un valor dado de ***SF*** (Apartado 4.2), el método de la máxima probabilidad conduce a la siguiente expresión para la mejor estimación de la incorporación:

$$\ln(I) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\ln(I_i)}{[\ln(SF_i)]^2}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{[\ln(SF_i)]^2}} \qquad (5.3)$$

Cada valor individual I_i es la estimación puntual de la incorporación obtenida de:

$$I_i = \frac{M_i}{m(t_i)}$$

Por tanto, ***ln(I)*** no es más que la media ponderada de los logaritmos ***ln(I_i)*** de las estimaciones individuales de la incorporación obtenidas de cada medida individual M_i, utilizando como factor de ponderación el inverso del cuadrado del logaritmo del factor de dispersión de cada medida M_i.

Generalmente el factor de dispersión está dominado por las incertidumbres de ***Tipo B*** por lo que se puede considerar que todos los ***SF*** son constantes, es decir son iguales para todas las medidas del mismo tipo de vigilancia. Con ello ***ecuación 5.3*** de la mejor estimación de la incorporación se convierte en la siguiente:

$$\ln(I) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \ln(I_i) = ln\left[\left(\prod_{i=1}^{n} I_i\right)^{\frac{1}{n}}\right]$$

Por tanto la mejor estimación ***I*** de la incorporación no es más que la media geométrica de las estimaciones individuales I_i.

$$I = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} I_i} \qquad (5.4)$$

En este caso la mejor estimación de la incorporación es independiente de los factores de dispersión.

Cuando se dispone de conjuntos de datos de diferentes técnicas de vigilancia para medidas de bioensayo en las que los factores de dispersión son distintos, como por ejemplo para el caso de una serie de n_o medidas de ***orina*** y otra n_h de ***heces***, con factores de dispersión SF_{oi} para orina y SF_{hj} para heces, la ***ecuación 5.3*** se convierte en esta otra:

$$ln(I) = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} \frac{ln(I_i)}{\left(ln(SF_{o,i})\right)^2} + \sum_{j=1}^{n_h} \frac{ln(I_j)}{\left(ln(SF_{h,j})\right)^2}}{\sum_{i=1}^{n_o} \frac{1}{\left(ln(SF_{o,i})\right)^2} + \sum_{j=1}^{n_h} \frac{1}{\left(ln(SF_{h,j})\right)^2}} \qquad (5.5)$$

En donde I_i se refiere a las estimaciones individuales de la incorporación procedentes de las medidas de orina e I_j de las de heces.

También en estos casos los factores de dispersión están dominados por las incertidumbres de ***Tipo B*** con lo que se pueden considerar iguales los ***SF*** de todas las medidas de la misma técnica de bioensayo, es decir $SF_{oi} \equiv SF_o$ para todo $i=1,\ldots,n_o$ y lo mismo para los de heces; $SF_{hj} \equiv SF_h$ para todo $j=1,\ldots,n_h$ y por tanto la ***ecuación 5.5*** se convierte en esta otra:

$$ln(I) = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} \frac{ln\,(I_i)}{(ln\,(SF_o))^2} + \sum_{j=1}^{n_h} \frac{ln\,(I_j)}{(ln\,(SF_h))^2}}{\sum_{i=1}^{n_o} \frac{1}{(ln\,(SF_o))^2} + \sum_{j=1}^{n_h} \frac{1}{(ln\,(SF_h))^2}}$$

O de forma más simple:

$$ln(I) = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} \frac{ln\,(I_i)}{(ln\,(SF_o))^2} + \sum_{j=1}^{n_h} \frac{ln\,(I_j)}{(ln\,(SF_h))^2}}{\frac{n_o}{(ln\,(SF_o))^2} + \frac{n_h}{(ln\,(SF_h))^2}} \qquad (5.6)$$

5.4 Exposiciones prolongadas

Uno de los factores que tiene influencia en la interpretación de los resultados de las medidas de bioensayo es la variación temporal de las incorporaciones de material radiactivo. El comportamiento de la incorporación, muchas veces escasamente caracterizada, es un importante factor en la correcta interpretación de las medidas y por lo tanto de la evaluación de dosis. En general, la cantidad de actividad presente en el organismo o excretada diariamente depende del periodo de tiempo en que el individuo ha estado expuesto, y por tanto los resultados de las medidas de bioensayo reflejarán la superposición de incorporaciones previas, ya sean aisladas o persistentes.

Cualquier incorporación previa que influya en el resultado de la medida actual tiene que ser tenida en consideración. Se debe calcular el valor neto N_i de la actividad del radionucleido en cuestión restando del resultado M_i de la medida actual la contribución en actividad de todas las incorporaciones previas P_i ($N_i = M_i - P_i$). Por simplicidad e ignorando la incertidumbre de P_i, la ***ecuación 5.3*** anterior se puede aplicar para determinar la mejor incorporación con:

$$I_i = \frac{N_i}{m(t_i)} \qquad (5.7)$$

La aplicación de la ***ecuación 5.3*** a estos casos supone que los valores netos de actividad siguen una distribución log-normal con una ***SF*** dada (Apartado 4.2). Sin embargo es sabido que la distribución de los valores netos de actividad pueden no seguir una distribución log-normal porque al restar un valor P_i de otros valores M_i que si están log-normal distribuidos, no se genera una nueva distribución log-normal.

Una forma alternativa consiste en ajustar simultáneamente a todos los datos las incorporaciones previas así como la incorporación de interés empleando el método de la máxima probabilidad. Sin embargo esto requiere del uso de un software apropiado.

Exposiciones crónicas constantes

Cuando la exposición se prolonga durante varios días, tal vez como resultado de un incidente no detectado, los resultados de las medidas de bioensayo pueden interpretarse como una suma de contribuciones independientes de cada incorporación diaria. Por ejemplo, considérese el caso de una persona expuesta a una tasa constante en una exposición crónica durante un periodo de ***T*** días (desde ***0*** a ***T*** días) y la medida de bioensayo se lleva a cabo al cabo de t_i días después del inicio de periodo de la incorporación crónica. El valor de la función de retención o excreción por unidad de exposición crónica $m_{cro}(t_i)$ para una tasa de incorporación de ***1/T Bq/día*** vendrá dado aproximadamente por:

$$m_{cro}(t_i) = \frac{1}{T}\sum_{j=1}^{T} m(t_i - j) \qquad \text{cuando } T < t_i$$

o (5.8)

$$m_{cro}(t_i) = \frac{1}{T}\sum_{j=1}^{t_i-1} m(t_i - j) \qquad \text{cuando } T > t_i$$

De nuevo se puede utilizar la ***ecuación 5.3*** para determinar la mejor estimación ***I*** de la incorporación, siendo:

$$I_i = \frac{M_i}{m_{cro}(t_i)} \qquad (5.9)$$

La ***ecuación 5.8*** da solamente valores aproximados de $m_{cro}(t_i)$ y no es muy exacta si ***m(t)*** varía mucho durante el periodo del sumatorio. En estos casos hay que hacer uso de programas de software más apropiados para mejorar la exactitud de la integración numérica durante el periodo de la exposición crónica.

Exposiciones crónicas e intermitentes

En la vigilancia rutinaria de trabajadores, especialmente para radionucleidos de periodo largo, es muy aconsejable desarrollar un esquema que recoja con el mayor realismo posible el patrón de exposición del trabajador (por ejemplo ciclo semanal). El esquema de trabajo puede diferir de un trabajador a otro con lo que cada patrón de exposición tendrá características especiales. El uso de una función de entrada que represente la rutina de incorporación del trabajador permite la interpretación de los resultados de las medidas de bioensayo de acuerdo con el día en que se tomó la muestra. De esta forma se podrán tener mejor en cuenta los componentes de periodo corto asociados con la remoción pulmonar puesto que los componentes de remoción rápida de la excreción pueden introducir diferencias significativas antes y después de la interrupción de la exposición (por ejemplo durante un fin de semana). La interpretación de estos datos requiere la mayoría de las veces herramientas apropiadas de software y ello está más allá del alcance de este informe.

Para radionucleidos de periodo largo, las exposiciones crónicas llegan a generar un valor de equilibrio en la actividad del organismo. La ***Publicación 78 de ICRP*** (*ICRP 1997*) proporciona valores de equilibrio de la actividad corporal para algunos radionucleidos.

Para exposiciones prolongadas, se puede suponer una exposición crónica cuando el patrón real de la exposición no se conoce (exposiciones intermitentes o exposiciones crónicas no constantes). Suponer una exposición crónica constante en oposición a una exposición crónica únicamente en días laborables genera pequeñas diferencias en la estimación de dosis para radionucleidos de periodo largo.

6. Aspectos especiales del tratamiento de datos

6.1 Identificación de datos fuera de rango

Es conveniente disponer de un fundamento o método sistemático para identificar datos ***fuera de rango*** (***outliers***) y poder excluirlos. Datos fuera de rangopor encima o por debajo de la tendencia del resto de medidas tienen un significado distinto. Un dato por encima del resto puede significar una nueva incorporación y debiera investigarse (nuevas medidas o comprobación o revisión de las condiciones radiológicas del trabajo). Un dato por debajo es más probable que sea el resultado de un error de medida o de transcripción de un resultado de medida o debido a la fluctuación del metabolismo del individuo.

El problema de identificar los datos ***fuera de rango*** no es sencillo. En teoría estos datos ***fuera de rango*** deberían identificarse antes de proceder a ajustar las predicciones de los modelos metabólicos (las funciones de retención o excreción) con los datos medidos. Si no se hace así, hay que enfrentarse al dilema de qué hacer cuando el ajuste no es posible: si modificar las variables del modelo para ajustarse a los datos experimentales o eliminar aquellos valores experimentales que impiden el ajuste. Por tanto, idealmente, debería obtenerse en primer lugar la tendencia de los datos mediante, por ejemplo, el ajuste de los datos a una suma de exponenciales y después utilizar un test estadístico para rechazar los datos (*Marsh, et al. 2007*). En la práctica hay que tener en cuenta que este método consume mucho tiempo y muchos evaluadores emplean el juicio de experto cuando deciden rechazar algunos datos. Con respecto a la eliminación de valores experimentales, hay que tener cuidado con aquellos valores que en los primeros momentos tras la incorporación o en momentos ya tardíos, no parecen comportarse como las predicciones de los modelos; en ese caso es preferible ajustar los modelos que rechazar estos datos.

Para aquellos datos identificados como ***fuera de rango***, de debe probar si su inclusión o exclusión con los demás datos considerados válidos afectan a la magnitud de la incorporación y de la dosis. Si no afectan al cálculo, no se debe perder tiempo en justificar su exclusión y serán tenidos en cuenta. Pero si tienen efecto en el cálculo de la incorporación y de la dosis se debe aplicar un test estadístico para determinar si el dato está fuera de rango o no, y si lo está, rechazarlo.

Para identificar datos ***fuera de rango***, se propone el siguiente test estadístico. Un valor medido ***M(t)*** es un dato ***fuera de rango*** si se separa en más de SF^3 respecto de la tendencia del resto de datos. Dicho de otra forma, con el resto de datos válidos, sin contar a priori con este dato sospechoso, se hace el ajuste de las predicciones del modelo (funciones de retención o de excreción); si el valor ***M(t)*** medido, al compararlo con el que proporciona el ajuste para el tiempo ***t*** se desvía de este último en más de SF^3, entonces es un dato ***fuera de rango***.

Si la eliminación de los datos fuera de rangoreduce significativamente el conjunto de datos válidos, habrá que realizar más medidas para llevar a cabo la evaluación de dosis.

6.2 Tratamiento de datos por debajo del límite de detección

En muchas situaciones se dan casos en los que se mezclan valores positivos, es decir por encima del umbral de decisión ***UD***, y valores que se reportan como inferiores al límite de detección ***LD***. Tales conjuntos de datos están definidos como censurados cuando el número de datos por debajo del ***LD*** es conocido. Las definiciones del ***límite de detección*** y el ***umbral de decisión UD*** asociado vienen dadas en las normas ***ISO*** (*ISO 2010, ISO 2010b*) y en el Apartado 3.2. En estos casos se recomienda guardar registros de la estadística del contaje original y de cualquier otra información asociada a ella para todos los datos, incluso para aquellos por debajo del ***UD***, como por ejemplo, cuentas o tasa de cuentas del fondo, duración de la medida del fondo y de la muestra, factores de calibración (***Bq por cps***), incertidumbres evaluadas y actividad estimada, etc. Todos los datos originales pueden ser usados en la evaluación de la dosis teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a cada resultado. No es recomendable la sustitución de los datos originales por una expresión tal como ***"menor que el LD***".

SI algunos datos se reportan como menores que el ***LD*** y solo se ha registrado el valor del ***LD***, el método de la máxima probabilidad proporciona una estimación no sesgada de la incorporación (Anexo ***2***). En los casos en los que la incertidumbre está dominada por los errores de ***Tipo B***, la función de probabilidad se puede describir por una distribución log-normal (Apartados 5.3 y Anexo ***2***). Para estos casos se puede demostrar que para conjuntos de datos censurados, el método de la máxima probabilidad conduce a una estimación no sesgada de la incorporación si se conoce la incertidumbre de las medidas (*Marsh 2002*).

Si no es posible la aplicación del método de la máxima probabilidad por no disponer de un software apropiado, se pueden utilizar entonces algunas otras fórmulas simplificadoras; por ejemplo, tratar cada valor reportado como ***"menor que LD"*** como un valore positivo **igual al valor del *LD***, o a ***la mitad del LD***, es decir iguales a ***LD/2***, o ***iguales a la mitad del umbral de decisión***, es decir, a ***UD/2***. La primera opción conduce claramente a una sobreestimación de la incorporación, pero no existe un método sencillo para cuantificar el grado de sobreestimación. En aras de armonización con ***ISO 27048*** (*ISO* 27048:*2010*) se recomienda tratar los ***resultados inferiores*** al ***LD*** como valores positivos igual a la ***mitad del umbral de decisión***, es decir a ***UD/2***. Sin embargo, hay que reconocer que esta decisión no tiene un fundamento matemático bien asentado.

6.3 Criterios para rechazar un ajuste

Los supuestos que subyacen en la evaluación de las incorporaciones y dosis son:

- La estructura del modelo biocinético es una representación realista de los procesos físicos y biológicos del individuo.
- Los valores cuantitativos de las variables o parámetros del modelo son correctos.

La estimación de las magnitudes de bioensayo (dosis e incorporaciones) no estará sesgada si se cumplen las dos condiciones anteriores. Estos supuestos son análogos a la hipótesis nula en la estadística clásica. En aquellos casos en que las predicciones del modelo no se ajustan o son inconsistentes con las medidas obtenidas (p.e. el ajuste es inadecuado) y se ha verificado que las medidas son correctas y no están

sesgadas, habrá que concluir que la estructura del modelo en si o los valores de sus parámetros son incorrectos. La opción estadística clásica es rechazar el modelo y repetir la evaluación con diferentes valores de los parámetros del modelo o con una nueva estructura del modelo para que las predicciones no sean inconsistentes con las medidas. Antes de rechazar la estructura del modelo en si, habrá que considerar en primer lugar cambios en los valores de los parámetros del modelo. Esta guía no considera la opción de rechazar el modelo, solo de cambiar los valores de algunos de sus parámetros o variables.

Es importante recordar que no es posible probar que la hipótesis nula sea cierta. Se utilizan pruebas estadísticas para indicar que la hipótesis nula es falsa. El criterio para rechazar la hipótesis nula (es decir, afirmar que el ajuste es inadecuado) deberá haberse establecido antes de que la evaluación haya sido llevada a cabo.

La medida de la ***bondad del ajuste*** y los criterios para decidir que el ajuste es suficientemente bueno, son por tanto asuntos críticas. Aquí puede haber un conflicto entre "***armonización***" y "***exactitud***". El número de datos disponibles puede jugar un papel importante a la hora de decidir si un ajuste se acepta o se rechaza. Generalmente, cuanto mejor sean los datos medidos (en calidad y cantidad), mayor será la probabilidad de que el test estadístico muestre que los datos son inconsistentes con el modelo. Si los datos son pobres, es más fácil que el modelo se ajuste mejor, de hecho en el caso extremo de una sola medida cualquier modelo serviría. Es por tanto importante que haya suficientes datos disponibles para evaluar una dosis significativa y cuanto mayor sea la dosis mejores deberán ser los datos medidos. En el ***Apartado 6.5*** se hace una propuesta de lo que se considera "***suficiente***" en cuanto a la mínima cantidad de datos que serían aceptables.

Un tratamiento completo de todas las posibles pruebas estadísticas que se pueden utilizar para cuantificar cuando un ajuste es inadecuado está fuera del alcance de este documento .En esta guía se adopta el test estadístico del ***chi-cuadrado*** χ_0^2 para rechazar un ajuste.

Si se supone que cada medida M_i sigue una distribución ***log-normal*** con un factor de dispersión ***SF***, para ***n*** medidas, el valor de χ_0^2 vendrá definido por:

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{ln\,(M_i) - ln\,[I.m(t_i)]}{ln\,(SF_i)} \right)^2 = \sum_{i=1}^{n} R_i^2 \qquad (6.1)$$

En la fórmula anterior, $I.m(t_i)$, representa el valor esperado de la medida M_i y los R_i representan los residuos (la diferencia entre el valor que predice el modelo y la medida experimental) normalizados.

La fórmula anterior solo aplica para aquellos valores que son superiores al límite de detección. Para conjuntos de datos censurados (datos incompletos, aquellos con valores por debajo de límite de detección) se propone utilizar la fórmula anterior solo para los valores por encima del límite de detección. Sin embargo, si la mayoría de los valores positivos (valores por encima del umbral de decisión) tienen valores cercanos al límite de detección, el test estadístico ***chi-cuadrado*** χ_0^2 pudiera no ser válido.

Si las predicciones son inconsistentes con los datos, entonces el valor calculado de χ_0^2 será inconsistente con el valor teórico de la distribución ***chi-cuadrado*** (χ^2) para un número específico de grados de libertad. El

número de grados de libertad cuando se varían ***I*** parámetros para un número ***n*** de medidas en un modelo lineal es ***n-I***, y el valor esperado de χ^2 es igual al número de grados de libertad, es decir a ***n-I***.

SI la incorporación ***I*** es el único parámetro que hay que ajustar, entonces ***I = 1*** y en número de grados de libertad es ***n-1***, siendo ***n*** el número de medidas. Si algún otro parámetro necesita ser modificado, entonces ***I*** será mayor que la unidad. Sin embargo, los modelos biocinéticos usados en dosimetría interna no son lineales con respecto a la mayoría de sus parámetros salvo con la incorporación y por lo tanto, el test estadístico del ***chi-cuadrado*** con ***n-I*** grados de libertad pudiera no ser ya válido sobre todo para pocos valores o pocas medidas.

Para los casos en los que haya un número suficiente de medidas, es decir cuando ***n >>I*** se propone suponer ***n-1*** grados de libertad para cada paso de los procedimientos reflejados en los diagramas de flujo (***Apartados 8 a 10***). Si se rechaza un ajuste suponiendo ***n-1*** grados de libertad, también se rechazará si el número real de grados de libertad fuera menor.

La probabilidad de observar un valor de χ^2 mayor de χ_o^2 para ***n-1*** grados de libertad viene dada por los ***p-valores*** que se pueden obtener de tablas estadísticas. En el anexo ***4*** se indica una forma de realizar una evaluación a mano del ***p-valor***. El ***p-valor*** es la fracción de la distribución teórica de χ^2 que se extiende más allá del valor calculado de χ_o^2. Por tanto, si el ***p-valor*** es muy pequeño, el valor calculado de χ_o^2 es mayor del esperado y por tanto habrá que concluir que las predicciones del modelo son inconsistentes con los datos y con las incertidumbres supuestas.

Se propone considerar inadecuados los ajustes (hay que rechazar los ajustes) si:

- La probabilidad de que χ^2 sea mayor de χ_o^2 es del 5% o menor (es decir, un ***p-valor*** menor de 0,05). En otras palabras, el ajuste es inadecuado para un nivel de probabilidad del 5%.
- Gráficamente, el ajuste parece o se ve a ojo como no razonable.

El valor de χ^2 emplea las incertidumbres estimadas SF_i. Si estas incertidumbres están sobreestimadas, el valor de χ_o^2 será pequeño y se podría aceptar un mal ajuste. Por el contrario, si las incertidumbres están subestimadas, entonces χ_o^2 será mayor y se podría entonces rechazar un buen ajuste. Esta es una de las razones de porqué es importante evaluar con realismo las incertidumbres.

Hay que reconocer que la apreciación gráfica visual de que un ajuste sea razonable o no es una cuestión subjetiva. En toda caso hay que considerar que un ajuste es inadecuado si todos o la mayoría de los datos están sist9emáticamente sobreestimados o subestimados.

Esto puede ser cuantificado de forma objetiva examinando la correlación en serie de los residuos (*Draper, 1981*). El coeficiente estadístico de autocorrelación (*Puncher, et al.2007, Chatfield 2004*) o el estadístico Durbin-Watson (*Durbin and Watson, 1970*) son posibles pruebas estadísticas que comparadas con el test de χ^2 tienen la ventaja de ser relativamente insensibles a la magnitud supuesta de las incertidumbres de las medidas. El Anexo ***3*** trata el coeficiente estadístico de autocorrelación y describe como se puede aplicar para evaluar si un ajuste es o no adecuado.

NOTA de la traducción: El ***p-valor*** se puede obtener empleando la función ***DITRS.CHI (χ_o^2 , n-1)*** de ***EXCEL***.

6.4 Influencia de las terapias de desincorporación

Los agentes quelantes como ***DTPA*** y otros tipos de agentes complejantes pueden incrementar de manera efectiva el ritmo de eliminación de los radionucleidos del organismo. De forma general se asume que los valores de la actividad excretada en orina y heces de los lantánidos y actínidos se ven afectados con los tratamientos con ***DTPA***. Y si esto es así, lógicamente, también la retención sistémica se verá afectada. Las tasas de excreción pueden verse influenciadas durante semanas o meses después del final del tratamiento.

Las experiencias de *CEA* y *AREVA* desde el año 1970 al año 2003 (*Grappin 2006, Grappin 2007*), llegaron a la conclusión de que tras el primer tratamiento con ***DTPA***, la eficacia completa de la siguiente inyección en la excreción urinaria de plutonio no se conseguía hasta pasados 20 días desde la primera inyección, poniendo de manifiesto que los efectos de la administración de ***DTPA*** duraban unos 20 días. Por tanto, los datos de excreción que se obtengan durante los 20 días posteriores al tratamiento con ***DPTA*** no pueden utilizarse para la estimación de dosis porque estarán afectados por la administración del ***DTPA***.

Un método alternativo de evaluar estos datos es utilizar un modelo biocinético para la excreción urinaria modificado tras la administración del agente quelante que tenga en cuenta o compense el incremento de la excreción (*Hall et al. 1978; La Bone, 1994; Bailey et al. 2002*). Esto es lo preferible cuando se requiere una evaluación temprana o urgente de los datos experimentales puesto que hace uso de toda la información disponible. Sin embargo, es difícil dar una recomendación específica o receta, dado que el tratamiento de cualquier dato de excreción dependerá de las circunstancias de la exposición y de la necesidad y tiempo disponible para la evaluación de dosis.

6.5 Número y tipo de datos requeridos para la evaluación de dosis

La fiabilidad de una estimación de dosis depende del número y tipo de datos de vigilancia (medidas experimentales). Por ello y dependiendo del radionucleido involucrado y del rango de dosis evaluada, existen unos mínimos requerimientos en cuanto al tipo y número de datos de vigilancia necesarios para la evaluación de dosis. Cuanto mayor sea la dosis evaluada, mayor tendrá que ser el número de datos requeridos.

La versión anterior de la ***Guía Ideas*** sugería el mínimo número y tipo de datos de vigilancia requeridos para la evaluación de dosis de algunos radionucleidos. Durante en proyecto CONRAD se extendió la evaluación para diferentes categorías de radionucleidos y los resultados se resumen en la ***Tabla 6.1***. Hay que tener siempre presente que la tabla se presenta para ilustrar el hecho de que cuanto mayor sea la dosis mayor deberá ser el número de medidas disponibles.

Tabla 6-1: Mínimo número de medidas y tipo de datos requeridos para las evaluaciones de dosis para algunas categorías de radionucleidos

Categoría del Radionucleido	Tipo de Vigilancia	Número requerido de medidas		
		D < 1 mSv (Requerimiento mínimo)	1 mSv < D < 6 mSv[a]	D > 6 mSv[b]
Todo tipo (F, M y S) de emisores α con un componente γ importante (U-235, Am-241, Cm-243, etc.)	Orina	-	2	3
	Heces	1	2	3
	Todo el cuerpo, órgano crítico o herida	-	2	4
Todo tipo (F, M y S) de emisores α sin un componente γ importante (Po-210, Pu,239, etc.)	Orina	-	3	5
	Heces	1	3	5
Todo tipo (F, M y S) de emisores β con un componente γ importante (Co-60, I-131, Cs-137, etc.)	Todo el cuerpo, órgano crítico o herida	1	2	4
	Orina	-	2	4
Emisores β tipo F sin un componente γ importante (H-3, C-14, etc.)	Orina	1	4	8
Emisores β tipo M/S sin un componente γ importante (Sr-90, etc.)	Orina	1	2	4
	Heces	-	2	4
Emisores gamma puros (I-123, Cr-51, Mn-54, etc.)	Todo el cuerpo u órgano crítico	1	2	4
	Orina	-	2	4

[a] **Los datos de la vigilancia deben abarcar un rango de al menos 30 días. Si el periodo efectivo del radionucleido es menor de 30 días, los datos deben abarcar un periodo de muestreo semejante a este periodo efectivo.**

[b] **Los datos de la vigilancia deben abarcar un rango de al menos 60 días. Si el periodo efectivo del radionucleido es menor de 30 días, los datos deben abarcar un periodo de muestreo de al menos el doble de este periodo efectivo.**

En base a los datos de la ***Tabla 6.1*** se construye la ***Tabla 6.2*** que refleja el mínimo número y tipo de medidas necesarias para la evaluación de dosis para algunos radionucleidos relevantes.

Idealmente, las medidas deberían distribuirse apropiadamente a lo largo del intervalo de tiempo indicado en la tabla ***6.1***, aunque hay que tener en cuenta que los rangos de tiempo indicados en las tablas ***6.1*** y ***6.2*** no se corresponden con los de los periodos para la vigilancia rutinaria dados en las tablas del ***Apartado 3*** de la guía ni con los indicados en ***ISO 20553***.

Tabla 6-2: Mínimo número de medidas y tipo de datos requeridos para las evaluaciones de dosis para algunos radionucleidos específicos y sus respectivos procedimientos de vigilancia

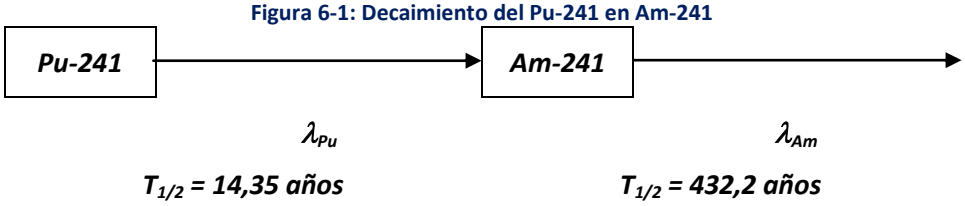
Isótopo	Tipo de vigilancia	Datos (medidas) de vigilancia requeridos					
		D < 1 mSv		1 mSv < D < 6 mSv		D > 6 mSv	
		Número	Rango de tiempo (días)	Número	Rango de tiempo (días)	Número	Rango de tiempo (días)
H-3	Orina	1	-	4	10	8	20
Co-60	Todo el cuerpo	1	-	2	30	4	60
	Orina	-	-	2	30	4	60
Sr-90	Orina	1	-	2	10	4	20
	Heces	-	-	2	10	4	20
I-131	Tiroides	1	-	2	7	4	14
	Orina	-	-	2	7	4	14
Cs-137	Todo el cuerpo	1	-	2	30	4	60
	Orina	-	-	2	30	4	60
U-235	Orina	-	-	2	30	3	60
	Heces	1	-	2	30	3	60
	Pulmones	-	-	2	30	4	60
Pu-239	Orina	-	-	3	30	5	60
	Heces	1	-	3	30	5	60
Am-241	Orina	-	-	2	30	3	60
	Heces	1	-	2	30	3	60
	Pulmones	-	-	2	30	4	60
	Huesos[a]	-	-	1	-	2	60

[a] **Estas medidas son deseables siempre que puedan estar disponibles, si se dispone de medios e instalaciones para ello**

6.6 Evaluación del crecimiento (incremento de actividad) del Am-241 procedente del Pu-241

El ***Pu-241*** con un periodo de ***14,35 años***, (***5,24 10^3 días***) decae en ***Am-241*** (***Figura 6-1***) con un periodo de ***432,2 años*** (***1,5786 10^5 días***)

Figura 6-1: Decaimiento del Pu-241 en Am-241



Para interpretar las medidas de bioensayo del ***Am-241*** (medidas directas o indirectas en orina y/o heces) tras una exposición a una mezcla de radionucleidos de plutonio y americio, hay que considerar el incremento de actividad del ***Am-241*** procedente del ***Pu-241***. Este incremento de la actividad del ***Am-241*** es despreciable inmediatamente después de la incorporación pero puede ser importante en momentos posteriores.

La actividad A_I del ***Am-241*** en función de la actividad del ***Pu-241*** viene dada por la siguiente conocida fórmula:

$$A_I = \frac{A^0_{Pu} \cdot \lambda_{Am}}{\lambda_{Am} - \lambda_{Pu}} \left(e^{-\lambda_{Pu} t} - e^{-\lambda_{Am} t}\right) \qquad (6.2)$$

Donde

λ_{Pu} es la constante de decaimiento radiactivo del Pu-241

λ_{Am} es la constante de decaimiento radiactivo del Am-241

A^0_{Pu} es la actividad inicial del ***Pu-241***.

Para ilustrar como la ***ecuación 6-2*** se puede utilizar para tener en cuenta el crecimiento del ***Am-241*** procedente del ***Pu-241***, considérese el caso de un trabajador expuesto a una incorporación única de una mezcla de ***Am-241*** y otros isótopos del plutonio y sea la relación inicial de las actividades de ***Pu-241*** a ***Am-241*** en el momento de la incorporación la siguiente:

$$\frac{A^0_{Pu}}{A^0_{Am}} = r_{Pu/Am}$$

Si la función de retención o de excreción del ***Am-241*** es $m_{Am}(t)$ en aquellos casos en los que solo hay Americio (no generado de las transformaciones nucleares del Pu-241), entonces en aquellos otros casos en donde exista además actividad de ***Am-241*** procedente del ***Pu-241***, la actividad total de ***Am-241*** (generado y no generado) por unidad de incorporación será:

$$m^{tot}_{Am}(t) = m_{Am}(t) + e^{\lambda_{Am} t} . m_{Am}(t) . A_I \quad (6.3)$$

Donde A_I viene dada por la ***ecuación 6.2*** en la que A^0_{Pu} es igual a $r_{Pu/Am}$; $A^0_{Pu} = r_{Pu/Am}$

El valor de $e^{\lambda_{Am} t} . m_{Am}(t)$ indica el valor esperado de ***Americio*** estable en la medida de bioensayo por unidad de incorporación, es decir, la función de retención del ***Am estable*** sin tener en cuenta el decaimiento radiactivo.

La ***ecuación anterior 6.3*** supone que el modelo biocinético del ***Am-241*** es el mismo que el del ***Pu-241*** cuando se tiene en cuenta el crecimiento de la actividad del ***Am-241***. Si se sustituye la ***ecuación 6.2*** en la ***6.3*** se obtiene esta otra:

$$m^{tot}_{Am}(t) = m_{Am}(t) \left[1 + \frac{r_{Pu:Am} \cdot \lambda_{Am}}{\lambda_{Am} - \lambda_{Pu}} \left(e^{(\lambda_{Am} - \lambda_{Pu}) t} - 1\right)\right] \qquad (6.4)$$

La expresión entre corchetes puede considerarse como el factor de incremento por el que hay que multiplicar la función de retención/excreción del ***Am-241*** debido a su crecimiento procedente del ***Pu-241*** tras una incorporación única en ***t=0***. Este ***factor de crecimiento*** se muestra en función del tiempo en la ***Figura 6.1*** siguiente para el caso en que la relación inicial entre las actividades del ***Pu-241*** y ***Am-241*** ($r_{Pu/Am}$) sea de ***111***, que es una relación típica para combustible gastado de centrales nucleares 5 años después de la separación química (***Tabla 14.10*** del Anexo ***1***). Como se ve en la ***Figura 6.1***, el factor de crecimiento es

menor de ***1,1*** para un tiempo menor de ***200 días*** pero mayor de ***1,3*** para tiempos ***posteriores a 650 días*** (1,8 años). El valor del factor de crecimiento depende tanto de $r_{Pu/Am}$ como del tiempo tras la incorporación.

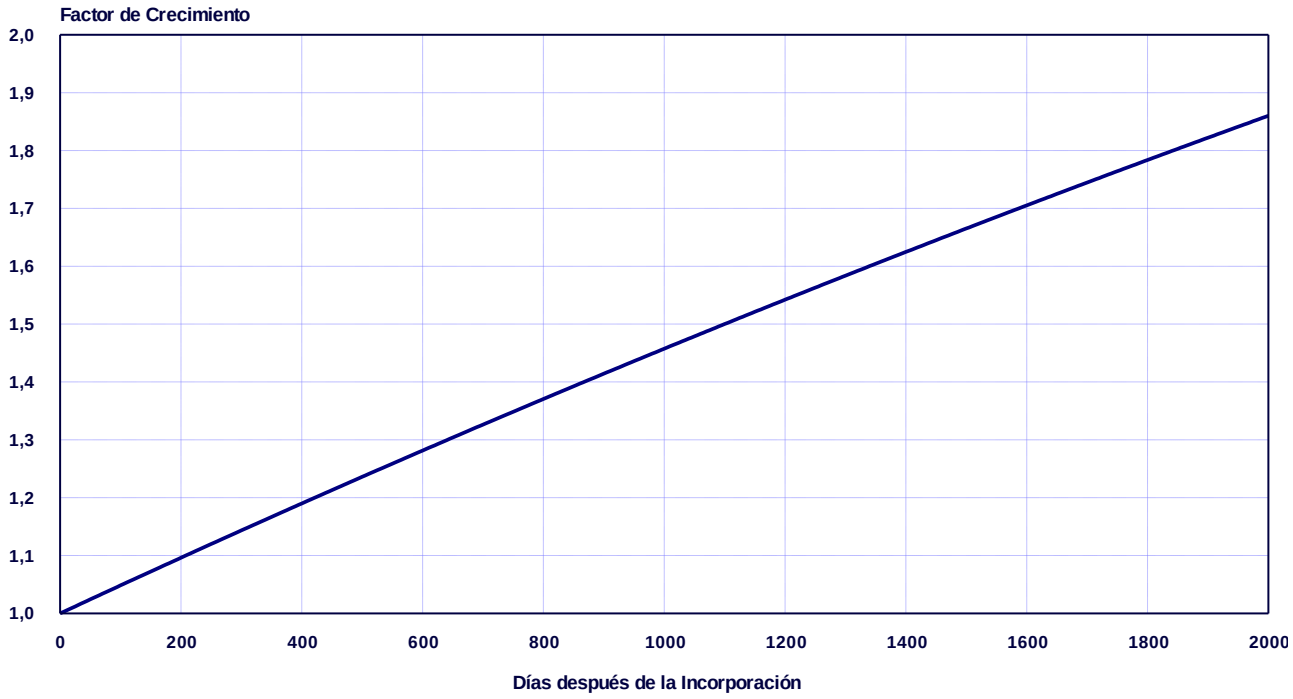


Figura 6.1 Factor multiplicativo por el que hay que incrementar el valor de la función de retención (excreción) del Am-241 debido a su crecimiento procedente del decaimiento del Pu-241, tras una incorporación única de una mezcla de Am-241 e isótopos de plutonio. En este ejemplo, la relación inicial de actividades de Pu-241 a Am-241 es de 111

La incorporación de la actividad inicial de ***Am-241*** se puede estimar a través de los datos de bioensayo obtenidos (medidos) de ***Am-241*** ajustando los valores esperados de la función de retención/excreción $m_{Am}^{tot}(t)$ con los datos medidos como se ha indicado en el ***Apartado 5***. La incorporación de la actividad de plutonio se puede calcular a través de la relación inicial de las actividades de ***Pu*** y ***Am*** y de la incorporación de ***Am-241***.

7. Proceso estructurado

7.1 Introducción

En las secciones siguientes se describen de una manera estructurada los pasos a seguir para la estimación de dosis internas a partir de los datos (de medidas) obtenidos durante la vigilancia individual de la exposición interna de un trabajador.

Se trata de una serie de "***etapas***", correspondientes a los niveles de tareas indicados en el ***Apartado 2***. Cada etapa consta de una serie de "***pasos***", representados en diagramas lógicos que habrá que ir siguiendo según el caso, con una breve explicación de cada etapa. Se hacen consideraciones especiales en cuanto a la calidad y cantidad de los datos necesarios para evaluaciones con dosis mayores de ***1*** y ***6*** mSv.

7.2 Todas las exposiciones (Etapa 1)

En esta primera etapa se comprueba si la medida se corresponde con un ***Nivel 0***, es decir aquellos casos en que se espera que la ***dosis anual*** (dosis efectiva comprometida por incorporación de radionucleidos en un año calendario) esté por debajo de ***0,1*** mSv, ***incluso si se han producido incorporaciones similares o mayores en todos y cada uno de los intervalos de vigilancia individual del año en cuestión***. En este ***Nivel 0*** no hay necesidad de evaluar de manera explícita la incorporación o la dosis a partir de los valores medidos. La dosis efectiva se puede registrar como ***0***. Sin embargo, es recomendable guardar el valor medido ya que podría servir en evaluaciones futuras.

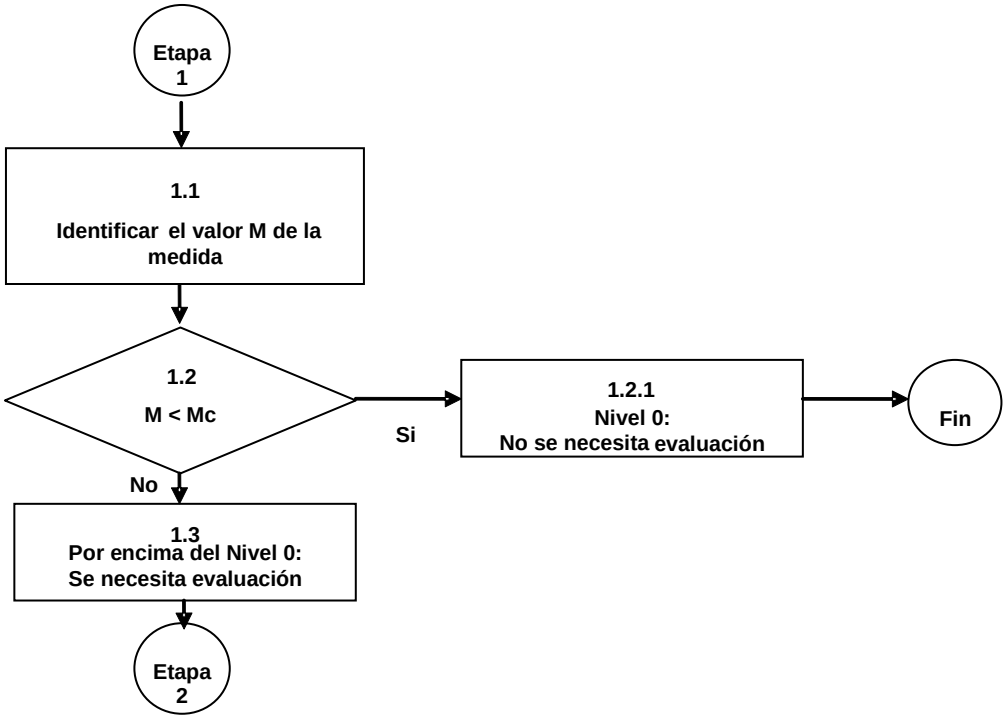


Figura 7.1 Etapa 1. Comprobación de la necesidad de una evaluación de dosis

Paso 1.1. ***Identificar el valor medido (M) y la duración del intervalo de vigilancia (T)***. Es posible que algunos datos deban tener algún tratamiento previo antes de realizar la evaluación de dosis. En particular se tendrá en consideración la presencia potencial de otros radionucleidos además del medido (el radionúclido indicador) que pudieran contribuir de forma importante a la dosis o aún exceder a la correspondiente al radionucleido indicador. En el caso de una incorporación con mezcla de radionucleidos, se deberá prestar atención al radionucleido que supuestamente produzca la mayor dosis.

Paso 1.2. ***Comparar la actividad medida con la magnitud crítica M_c***. Si ***$M < M_c$*** entonces la dosis anual es probablemente menor de ***0,1*** mSv. La evaluación se acaba y el valor medido ***M*** se registra junto con cualquier otra información de utilidad (radionucleido, actividad, tipo de medida, tipo de vigilancia, etc.). Conviene tener presente que en el caso de los actínidos, la medida ***M*** es generalmente mayor que ***M_c*** por lo que no es necesario comparar explícitamente esas medidas con su correspondiente actividad critica.

Paso 1.3. ***Exposición por encima del Nivel 0***. Cuando ***$M > M_c$*** la dosis anual podría ser superior a ***0,1*** mSv. Se va a la ***Etapa 2*** para verificar la relevancia estadística de la medida.

7.3 Todas las exposiciones por encima del Nivel 0: Comprobar la relevancia de la medidas nuevas y su consistencia con evaluaciones previas. (Etapa 2)

La ***Etapa 2*** se refiere a aquellos casos en que se prevé que la dosis anual debida a la incorporación pueda ser superior a ***0,1*** mSv. En este nivel se debe evaluar de forma explícita la incorporación o la dosis. Antes de comenzar la evaluación se recomienda representar gráficamente los datos y hacer algunos cálculos rápidos o a mano para entender el caso (***Paso 2.0***). Además se recomienda estimar la importancia estadística del valor medido ***M***. Ello incluye la valoración de la incertidumbre de ***M*** (***Paso 2.1***), así como la contribución a ***M*** de incorporaciones anteriores (***Paso 2.2***), todo ello con objeto de decidir si ***M***:

- es debido a una nueva incorporación, o
- a una incorporación anterior, o
- está en contradicción con evaluaciones anteriores (***Pasos 2.3 - 2.7***).

Paso 2.0: ***Entender el caso***. Representar gráficamente los datos (incluidos los de medidas anteriores si los hubiera) y hacer algunos cálculos simples. Evaluar el orden de magnitud de la incorporación y de la dosis efectiva comprometida.

Paso 2.1. ***Cuantificar la incertidumbre de M***. Se requieren estimaciones realistas de la incertidumbre de cada dato medido. Las incertidumbres se expresarán indicando el "***factor de dispersión***" (***SF***) total. (ver como se evalúa la incertidumbre de los datos considerando la incertidumbre de la medida y todas las demás incertidumbres evaluadas con SF_B – ver ***Apartado 4.2***)

Paso 2.2. ***Calcular las contribuciones P de incorporaciones anteriores***. Se cuantifican las contribuciones (***P***) de todas las incorporaciones anteriores en las que se detectó el radionucleido en cuestión teniendo en cuenta todas las vías de incorporación y todas las incorporaciones de mezclas de radionucleidos en las que estuvo presente el radionucleidos relevante.

$$P = \sum_{i}^{Todas\ las\ anteriores} I_i . m(t - t_i)$$

En donde I_i son los valores de actividad de incorporaciones evaluadas en momentos anteriores t_i siendo t el momento de la medida ***M***.

Paso 2.3. ***Confirmar nuevas incorporaciones***. Se considera confirmada una nueva incorporación si $M/SF^2 > P$. Determinar el valor neto $N = M - P$ de la medida del radionucleido restando ***P*** del valor medido de actividad ***M*** e ir a la ***Etapa 3*** para realizar una evaluación normal de ***Nivel 1***. Con este criterio sólo existe una probabilidad del ***2.5%*** de darse un falso positivo (es decir, suponer una nueva incorporación cuando esta no ha tenido lugar).

Paso 2.4. ***Nueva incorporación no confirmada***. En el caso de que $M/SF^2 < P < M*SF^2$, el valor medido ***M*** es coherente y consistente con las incorporaciones evaluadas previamente y no hay evidencia de una nueva

incorporación. La evaluación se detiene y el valor medido ***M*** se registra junto con cualquier otra información de utilidad (radionucleido, actividad, tipo de medida, tipo de vigilancia, etc.)

Paso 2.5. ***Discrepancia con evaluaciones anteriores***. Existen discrepancias con evaluaciones anteriores si ***P > M*SF²***. La causa de la discrepancia puede ser (***a***) que el valor medido ***M*** no es fiable y/o (***b***) las evaluaciones anteriores no son correctas. Por ejemplo, una incorporación que ocurra cerca del final del intervalo previo de vigilancia puede haberse sobrestimado si se ha supuesto que ha tenido lugar en el punto medio del intervalo de vigilancia

Paso 2.6. ***Comprobar la fiabilidad de M***. En medidas de cuerpo entero las fuentes de incertidumbre son: contaminación externa y calibraciones no coincidentes con la geometría de medida (por ejemplo determinar la actividad en pulmones con una calibración para geometría de cuerpo entero o actividad de pulmones calculada en presencia de actividad residual del tracto gastrointestinal). Para medidas en excretas, las fuentes de incertidumbre son: contaminación de la muestra, recolección incompleta de la muestra, errores en el procesamiento de la muestra, etc.

Paso 2.6.1. ***Reevaluar las incorporaciones anteriores***. Si no se puede demostrar que ***M*** no es fiable, reevaluar las incorporaciones anteriores; para ello, ir al "***Procedimiento especial***" de la ***Etapa 4***.

Paso 2.7. ***Comprobar la medida M***. Si se puede demostrar que ***M*** es errónea, realizar las correcciones necesarias o repetir la medida si ello es posible y regresar al ***Paso 2.0***.

La ***Figura 7.3*** muestra un ejemplo de una hipotética medida ***M*** en ***t*** = ***90*** días (***cuadrado rojo***) junto con los valores de ***M/SF²*** y ***M*SF²*** (***triángulo verde*** y ***rombo azul*** respectivamente). También se muestran curvas hipotéticas de ***P*** correspondientes a posibles medidas anteriores realizadas a ***t = 0***. La curva verde está por debajo del valor de ***M/SF²*** por lo que la medida ***M*** se puede atribuir a una nueva incorporación y por tanto se puede iniciar el procedimiento normal de evaluación de dosis. La curva roja está comprendida entre ***M/SF²*** y ***M*SF²***, es decir que la medida ***M*** es consistente con las medida anterior en ***t = 0*** con lo que no ha existido una nueva incorporación y no se requiere una nueva evaluación de dosis. La curva azul está por encima de ***M*SF²***, es decir, la medida ***M*** es menor que la que cabría esperar sobre la base de la medida anterior realizada en ***t=0***. Existe una discrepancia entre la medida ***M*** y la incorporación anterior por lo que necesariamente habrá que reevaluar ***M*** y/o la incorporación anterior.

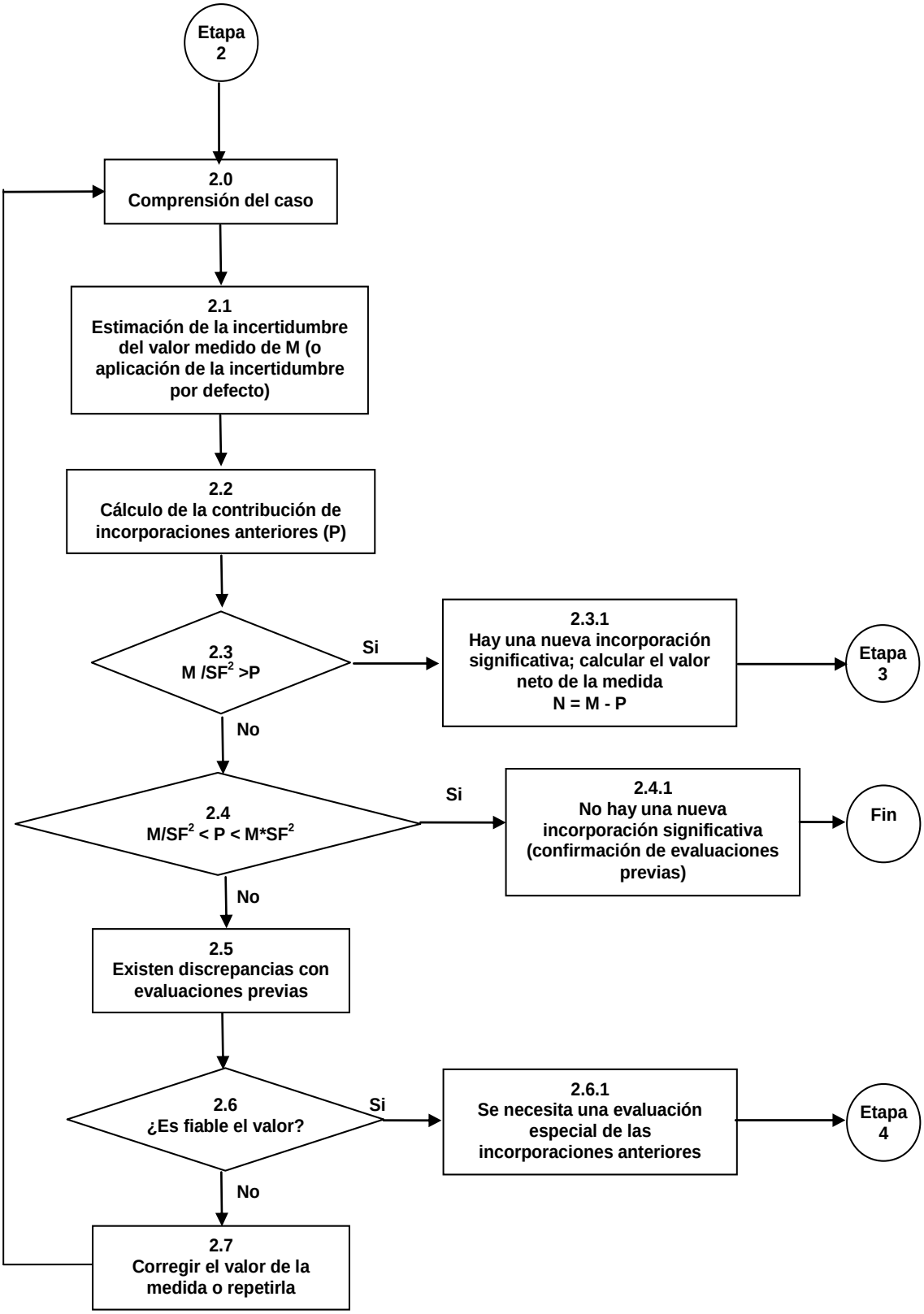


Figura 7.2 Etapa 2. Comprobación de la importancia de una nueva medida y su consistencia con evaluaciones previas

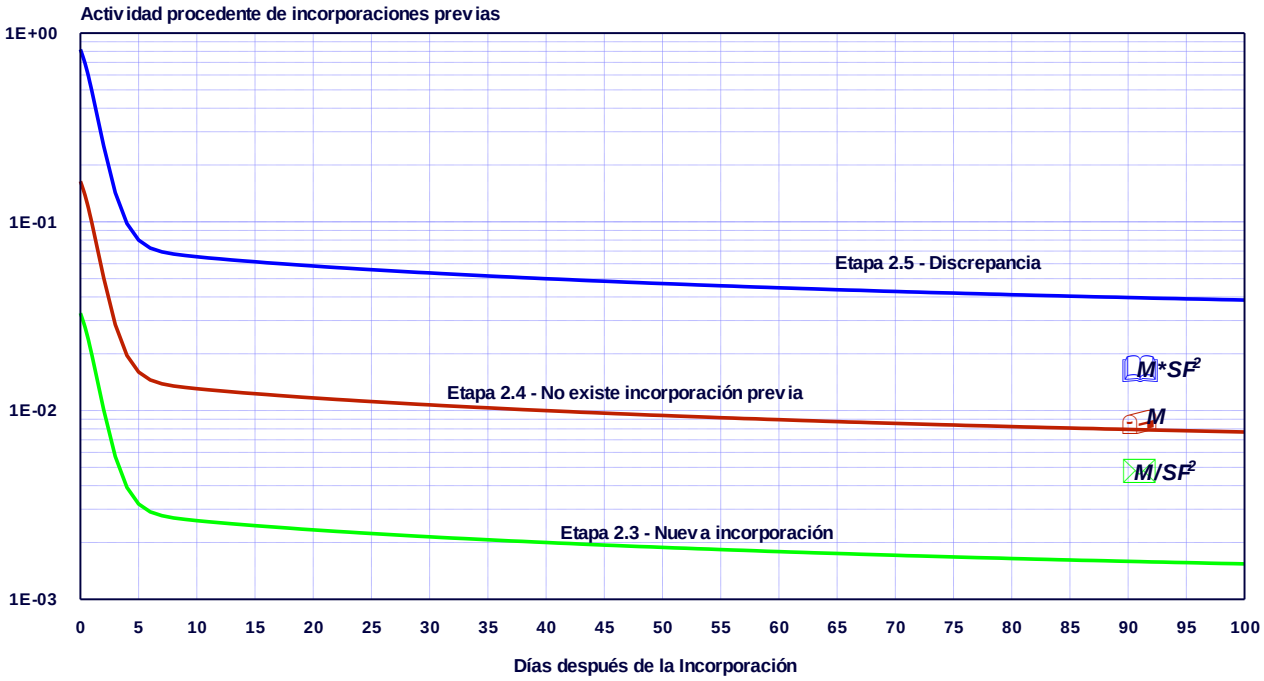


Figura 7.3 Comparación del valor de P (a los 90 días) con *M*, *M/SF²* y *M*SF²* para hacer la prueba de la presencia de una nueva incorporación, no nueva incorporación y discrepancia con medidas anteriores

7.4 Procedimiento estándar de evaluación para el Nivel 1 (Etapa 3)

Habiendo determinado que el valor medido ***M*** es debido a una nueva incorporación, la actividad y la dosis se evalúan a partir del valor neto ***N = M - P*** utilizando los valores de los parámetros por defecto de ICRP (***"a priori"***) de sus modelos biocinéticos. Este método ***normal*** (***estándar***) de evaluación de esta ***Etapa 3*** solo se debe emplear en ***vigilancias rutinarias***.

Paso 3.1. ***¿Procede el dato M de una vigilancia rutinaria?*** Si el valor medido ***M*** no se debe a una vigilancia rutinaria verificar el número de medidas disponibles: ir al ***Paso 3.1.1***.

Paso 3.1.1. ***Si se dispone de más de una medida***, ir al procedimiento especial de evaluación de la ***Etapa 4***. Si solo hay una medida continuar con el ***Paso 3.2***.

Paso 3.2. ***Identificar la vía de incorporación***. En vigilancias rutinarias, la vía más probable de incorporación es la inhalación, pero también podría ser la ingestión o una combinación de ambas. Solo se debe considerar la vía de ingestión en el caso de que se disponga de una clara evidencia para ello (evidencia bien establecida y documentada). De lo contrario, se debe asumir la inhalación como la vía de incorporación.

El caso de una única medida después de un accidente con ***herida*** es raro, por lo que si se confirma que la herida es la vía de incorporación, ir directamente al ***Paso 3.6*** para verificar la disponibilidad de más medidas y tras la ***Etapa 4*** seguir la elección de la vía de ***herida***.

Paso 3.3. ***Asignación de valores*** "***a priori***" a los siguientes parámetros:

- Modo de incorporación
- Momento de la incorporación
- Tamaño de partícula, tipo de absorción y valor de f_A para inhalación.
- Valor de f_A para ingestión

Para asignar valores a estos parámetros, utilizar en la medida de lo posible, valores específicos de cada instalación o del caso en consideración. Tal información (***"a priori"***) debe quedar bien establecida y documentada. Algunos ejemplos de estos parámetros son el Diámetro Aerodinámico de la Mediana de Actividad – ***AMAD***, en el caso de que haya sido determinado a través de un muestreador de aire apropiado (impactador en cascada), o el momento de la incorporación si la exposición potencial está delimitada, o se sabe que es debida a un incidente conocido. SI, como ocurre normalmente, no se conocen los valores específicos de esos parámetros, se utilizarán los siguientes valores por defecto (***a priori***):

- Modo de incorporación: ***Única***.
- Momento de la incorporación: ***Punto medio del intervalo de vigilancia***, es decir, punto medio del periodo comprendido entre la fecha de la medida y la fecha de la anterior medida o del inicio del intervalo o periodo de vigilancia.
- ***Inhalación***
  - ✓ Tipo de absorción y valor de f_A: Las publicaciones ***OIR*** de ***ICRP*** indicarán valores por defecto de estos parámetros. Mientras tanto se utilizarán los de la ***Publicación 68 de ICRP***, ***Anexo F (Tabla 3.3)*** (*ICRP-1994b*). Si no se conocen las características físico-químicas del isótopo (compuesto), en aquellos elementos en los que se puede elegir el tipo de absorción, se utilizará el tipo referido a "***compuestos no especificos***", si estuviera disponible. Para el uranio, no está disponible el "***compuesto no especifico***" y en este caso se utilizará el tipo ***M*** si no se dispone una información más específica, tal como se recomienda en la publicación ***71 de ICRP*** (*ICRP-1995c*).
  - ✓ Tamaño de partícula (AMAD): ***5 µm***.
- ***Ingestión***:
  - ✓ Valor de f_A: Las publicaciones ***OIR*** de ***ICRP*** indicarán valores por defecto de estos parámetros. Mientras tanto se utilizarán los de la ***Publicación 68 de la ICRP, Anexo E*** (*ICRP-1994b*)

Paso 3.4. ***Estimación de la incorporación y de la dosis***. Utilizando los valores asignados por defecto (***"a priori"***) a los parámetros anteriores de los modelos biocinéticos (***inhalación o ingestión***), se calcula la ***incorporación*** (***actividad incorporada***) dividiendo el valor neto ***N = M - P*** por la función apropiada de retención o de excreción. La dosis efectiva comprometida de calcula multiplicando la actividad incorporada determinada antes, por el correspondiente coeficiente de dosis en ***Sv/Bq*** (***dosis por unidad de incorporación***). Hay que tener la precaución de utilizar los mismos valores por defecto (***a priori***) de los parámetros de los modelos biocinéticos tanto en la determinación de las funciones de retención y/o de excreción como del coeficiente de dosis. De forma alternativa se puede calcular la dosis directamente

aplicando el concepto de dosis por unidad de actividad retenida (que vendrá desarrollado en los documentos OIR de ICRP), en cuyo caso solo habrá que registrar la dosis.

Paso 3.5. ***¿Es la dosis < de 1 mSv?*** Si la dosis efectiva comprometida estimada en el ***Paso 3.4*** es menor de ***1 mSv***, no hay necesidad de proseguir con la evaluación de dosis (***Paso 3.5.1***). De lo contrario se deben utilizar métodos especiales (***Etapa 4***) para una evaluación más detallada del caso.

Paso 3.5.1. ***Registro de datos***. Se registran los resultados en términos de actividad y de dosis efectiva comprometida del ***Paso 3.5*** junto con los correspondientes valores de los parámetros utilizados en el ***Paso 3.4***.

Paso 3.6. ***Si la dosis efectiva comprometida estimada en el Paso 3.4 es mayor de 1 mSv***, verificar el número de medidas disponibles. Si el número de medidas disponibles es menor que el indicado en la ***Tabla 6.1*** para la columna correspondiente a la magnitud de la dosis evaluada, obtener el número adicional de medidas necesarias (ir al ***Paso 3.6.1***). Si por el contrario, el número de medidas es suficiente, ir a la ***Etapa 4***.

Paso 3.6.1. Tras disponer del ***número de medidas requeridas***, ir a la ***Etapa 4***.

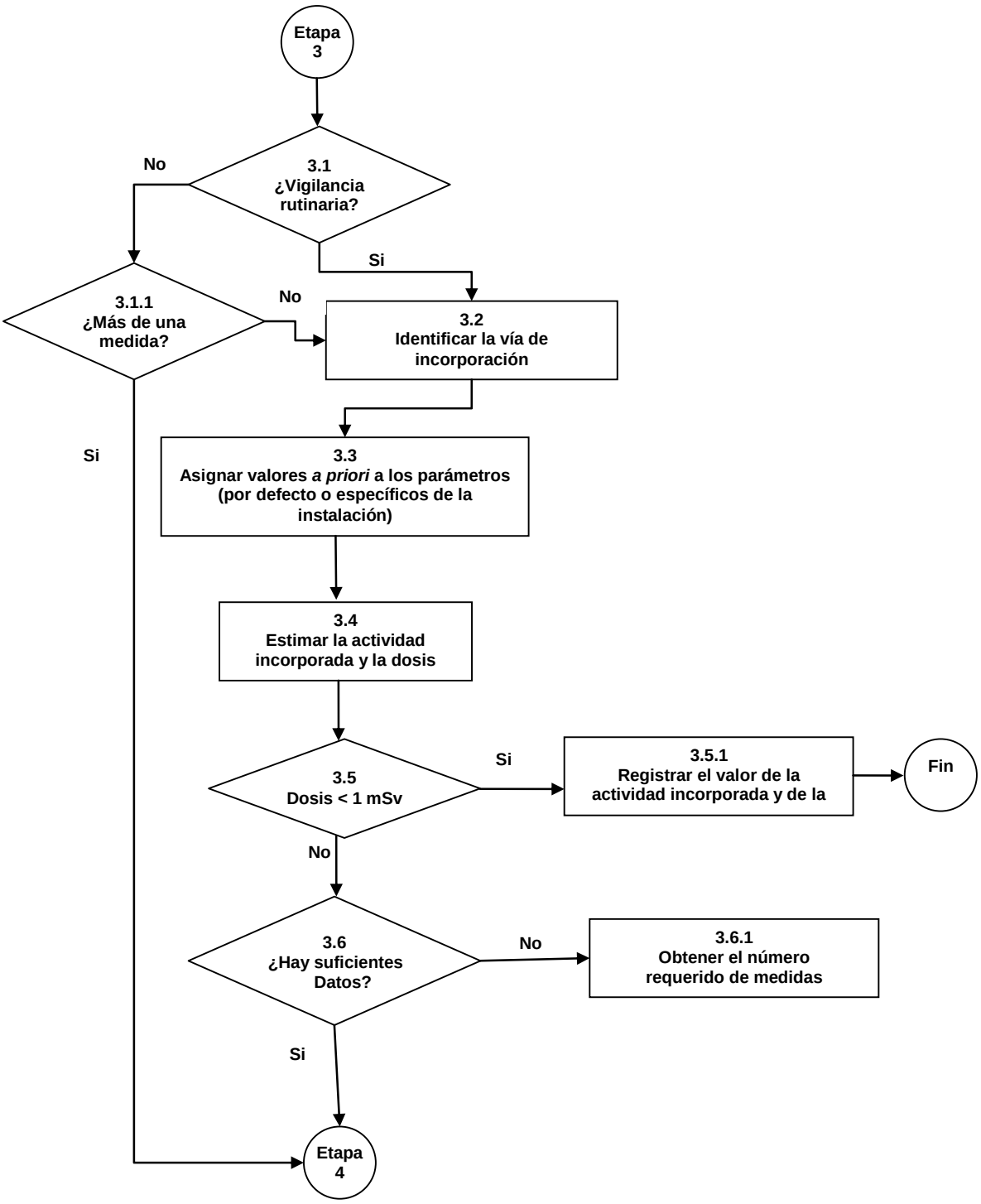


Figura 7.4 Etapa 3. Procedimiento de evaluación normal (estándar) para el Nivel 1

7.5 Identificación de la vía de incorporación para una evaluación especial superior al Nivel 1 (Etapa 4)

Se realizará una evaluación especial siempre que exista evidencia de que la dosis efectiva comprometida pudiera ser superior a ***1 mSv*** y en todos los casos de una vigilancia especial. En todos estos casos el procedimiento o método de estimación de dosis depende en gran medida de la vía de incorporación. Por tanto en esta ***Etapa 4*** se debe identificar la vía de incorporación

Paso 4.1. ***¿Solo inhalación?*** En muchas ocasiones se puede considerar la vía de incorporación como una inhalación pura, por ejemplo, si se ha detectado contaminación ambiental en el lugar de trabajo sin presencia de contaminación externa detectable en la persona que se analiza. En estos casos se aplica el procedimiento especial para los casos de inhalación (***Etapa 5***).

Paso 4.2. ***¿Solo ingestión?*** Algunas otras veces, pero pocas, puede haber evidencia de una ingestión pura, por ejemplo, si se detecta contaminación en la persona o en el lugar de trabajo, pero no existe contaminación ambiental (aunque esto puede no ser del todo cierto si la contaminación del ambiente de trabajo es fácilmente desprendible y por tanto inhalable). En estos casos aplica el procedimiento especial para ingestión (***Etapa 6***).

Paso 4.3. ***¿Inhalación e ingestión?*** En aquellas otras situaciones en la que se identifica contaminación en la persona o contaminación superficial en el lugar de trabajo y contaminación ambiental, la vía de incorporación podría ser una combinación de inhalación e ingestión. Estos casos se analizan como una combinación de inhalación e ingestión (***Etapa 7***). Sin embargo puede observarse un patrón similar de contaminación cuando la inhalación está compuesta por aerosoles de gran tamaño (***AMAD*** igual o superior a ***10 µm***). A no ser que el aerosol esté bien caracterizado (lo cual en la mayoría de las situaciones no es posible o no se dispone de esa caracterización), será difícil saber qué es más probable, si una inhalación o una ingestión, o qué fracción de la incorporación se debe a una ingestión. Se propone por defecto en esta ***Etapa 4*** suponer que se está ante un caso de inhalación pura a no ser que exista información suficiente para justificar que una parte de la incorporación es debida a una ingestión.

Paso 4.4. ***¿Herida?*** En el caso de una herida contaminada, se ha desarrollado un procedimiento especial para calcular la dosis por una incorporación a través de una herida. Esta vía de incorporación está considerada en la ***Guía IDEAS*** en la ***Etapa 8*** (***Paso 4.4.1***).

Paso 4.5. ***¿Inyección o absorción a través de la piel?*** Esta revisión de la ***Guía IDEAS*** no considera más vías de incorporación que las anteriores, es decir no contempla la incorporación directa por inyección o absorción a través la piel y por tanto la evaluación de estos casos, inyección o absorción por la piel, no está desarrollada en esta guía. En el caso de algún incidente con una jeringa y aguja, la evaluación puede utilizar por defecto el modelo de herida suponiendo la categoría soluble débil puesto que este enfoque es el que más se parece a un caso real.

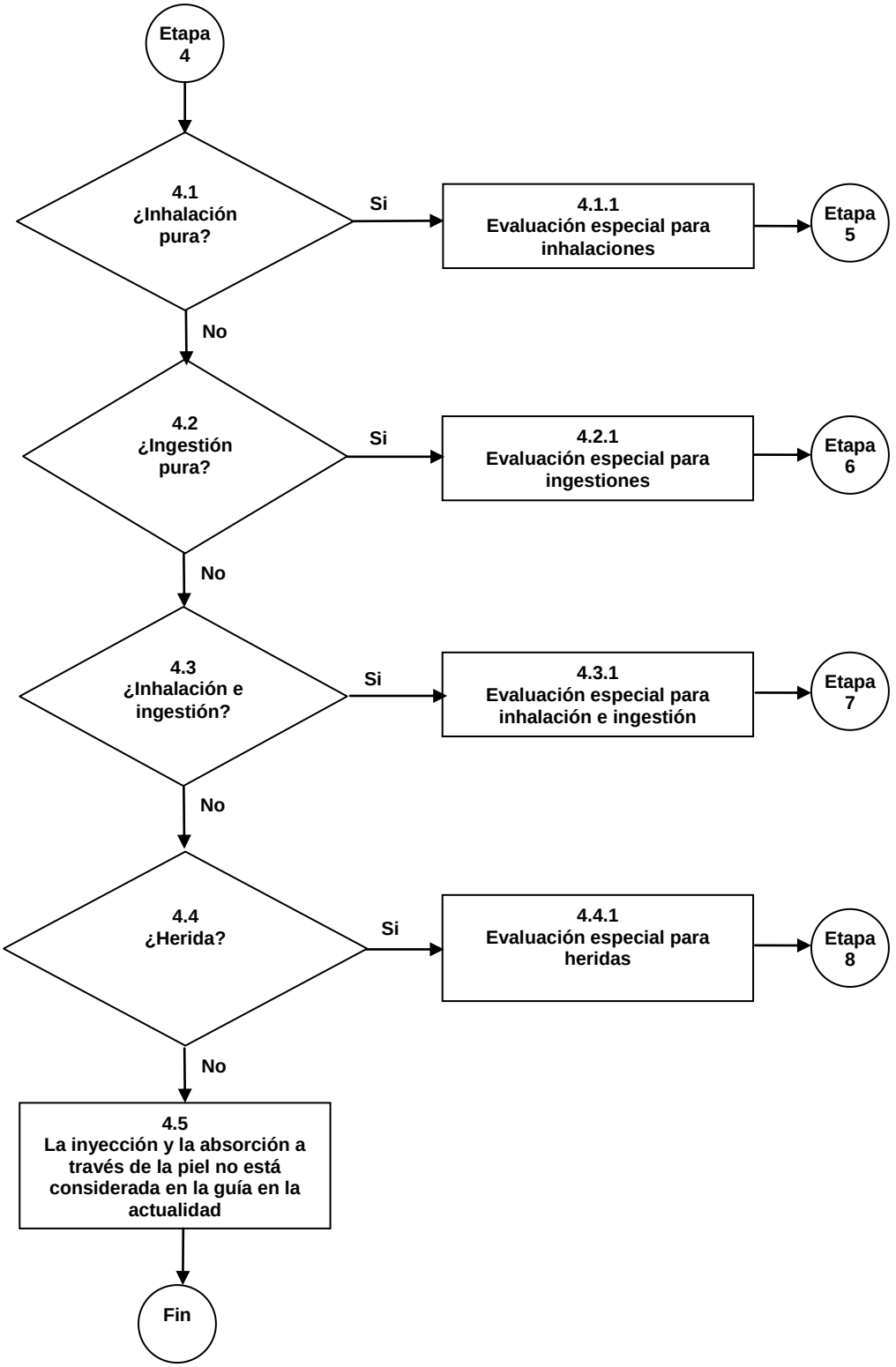


Figura 7.5 Identificación de la vía de incorporación para una evaluación especial superior al Nivel 1

8. Inhalación (Etapa 5)

8.1 Aspectos generales

El procedimiento especial para inhalación se agrupa en las tres etapas ***5A***, ***5B*** y ***5C*** siguientes (ver figura 8.1):

En la primera etapa (***Etapa 5A***) se lleva a cabo una evaluación sencilla utilizando valores ***a priori*** de los parámetros de los modelos biocinéticos, valores escogidos antes de llevar a cabo la evaluación. Este procedimiento es muy parecido al "***Procedimiento estándar***" de la ***Etapa 3***. La principal diferencia radica en que para un procedimiento especial suele haber más de una medida.

En la segunda etapa (***5B***) se aplican procedimientos para variar los dos principales factores o variables relacionadas con el material inhalado: el ***AMAD***, ***tipo de absorción*** y el ***momento de la incorporación***, si es desconocido, empleando los datos de las medidas (***a posteriori***).

En la tercera etapa (***5C***) se realiza una evaluación avanzada que aplica a aquellos casos para los que se dispone de una gran cantidad de datos. El aspecto fundamental de esta etapa es que los valores de los parámetros de los modelos se van ajustando sistemáticamente en un orden específico hasta que se obtiene un ajuste razonable de los datos (el ajuste que se obtiene con todos los datos no se ve rechazado por criterios específicos).

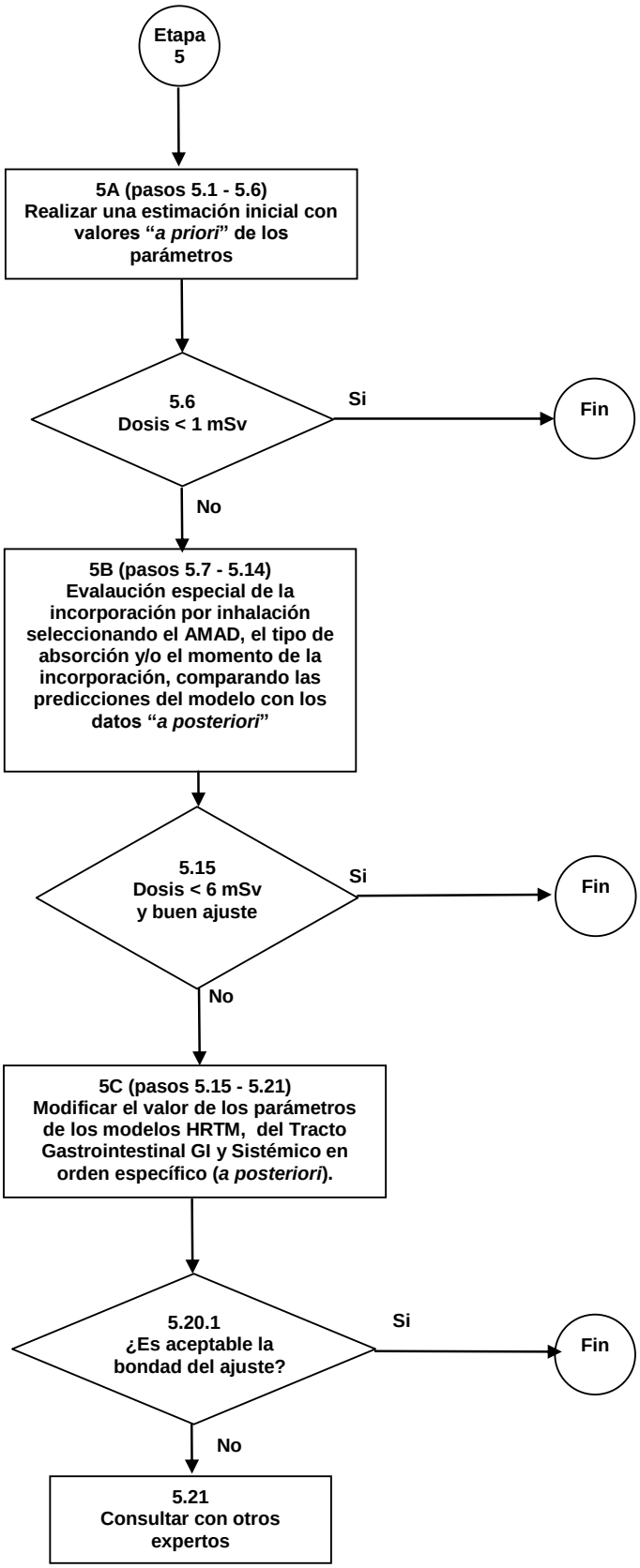


Figura 8.1 Etapa 5. Procedimiento especial para casos de inhalación superior al Nivel 1. Resumen general

8.2 Evaluación simple (Etapa 5A)

Paso 5.1. ***Identificación y preparación de los datos de medida***. Se parte de la base de que habrá más de una medida disponible para esta evaluación especial (***M***$_i$ para ***i*** = ***1*** hasta ***n***). Por tanto es importante que las incertidumbres asignadas a los datos sean realistas ("***factor de dispersión***" ***SF***, ***Paso 2.1***). Puede haber más de un tipo de medida (***orina***, ***heces***, etc.) y podría haber también más de un radionucleido involucrado en la exposición interna, situación muy usual. Si la incorporación no está asociada con algún incidente y por tanto se desconoce el momento de la incorporación, se prestará atención a otros datos como los resultados de vigilancias radiológicas del lugar de trabajo, muestreos de aire, etc., a fin de precisar en la medida de lo posible el momento de la incorporación.

Explorar la posibilidad de que existan algunos datos fuera de rango por medio del procedimiento indicado en el apartado 6.1

Paso 5.2. (***Como el Paso 2.3, para una sola medida***). Calcular las contribuciones (***P***$_i$) de todas las incorporaciones anteriores en las que se detectó el radionucleido en cuestión, teniendo en cuenta todas las posibles vías de incorporación y todas las incorporaciones de mezclas de radionucleidos en las que se detectó dicho radionucleido. Calcular los valores netos (***N***$_i$ ***= M***$_i$ ***- P***$_i$) del radionucleido restando ***P***$_i$ del valor medido ***M***$_i$.

Paso 5.3. (***Como el Paso 3.2 en el procedimiento estándar***, ***Etapa 3***, ***a excepción del momento de la incorporación***). Si se dispone de ellos se utilizarán valores específicos del caso o de la instalación. Tal información (***"a priori"***) deberá quedar bien establecida y documentada. Algunos ejemplos de estos parámetros son el ***Diámetro Aerodinámico de la Mediana de Actividad*** – ***AMAD*** (en el caso de que haya sido determinado a través de un muestreador de aire apropiado, por ejemplo un impactador en cascada), valores del ***tipo específico de absorción*** (si el material inhalado está suficientemente bien caracterizado), o el ***momento de la incorporación*** (si la exposición potencial está delimitada en el tiempo, o se sabe que ha sido debida a algún incidente conocido). De otra manera se utilizarán los siguientes valores por defecto:

- Modo de ***incorporación: Única***
- Tipo de ***absorción*** y valor de f_A: ***Valores por defecto*** recogidos en las futuras publicaciones OIR de ICRP. Mientras tanto se utilizarán los valores ***definidos en la Publicación 68 de ICRP***, ***Anexo F*** (*ICRP 1994b*). Si el compuesto es desconocido, para aquellos elementos en los que se puede elegir tipo de absorción, se utilizará el tipo referido a "***compuestos no especificos***", si estuviera disponible. Para el uranio en ausencia de información más específica se utilizará el tipo ***M***, tal como se recomienda en la publicación ***71 de ICRP*** (*ICRP 1995b*).
- ***Tamaño*** de partícula (***AMAD)***: ***5 µm***.

Paso 5.4. ***Momento de la incorporación conocido/desconocido***. Si esta evaluación especial se inició a raíz de un incidente o suceso del que se tiene información (y por tanto el momento de la incorporación es conocido), entonces se llevará a cabo una evaluación sencilla (***Paso 5.5***) semejante a la evaluación estándar (***Etapa 3***). Si se ha iniciado la evaluación especial a raíz de una medida rutinaria inconsistente con medidas anteriores (***Paso 2.6***) o por una dosis superior a ***1 mSv*** procedente de una ***evaluación normal*** (estándar)

(***Paso 3.4***) en la que probablemente no se conoce el momento de la incorporación, entonces habrá que aplicar procedimientos especiales adicionales de la ***Etapa 5B*** para conseguir una evaluación más detallada del caso.

Paso 5.5. (***Como en el Paso 3.3 del procedimiento normal*** (estándar), de la ***Etapa 3***, ***pero para más de una medida***). Usando los valores asignados a priori, se obtendrá una estimación de la incorporación I_i dividiendo el valor neto de la medida $N_i = M_i - P_i$ por la ***función de retención o de excreción m(t_i).***

La mejor estimación de la incorporación se puede calcular de acuerdo con la siguiente ecuación del ***Apartado 5*** de esta guía:

$$\ln(I) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\ln(N_i / m(t_i))}{[\ln(SF_i)]^2}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{[\ln(SF_i)]^2}} \qquad (8.1)$$

Donde ***SFi*** es el factor de dispersión del valor neto de la medida N_i. Si el factor de dispersión es el mismo para todas las medidas, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$I = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} \frac{N_i}{m(t_i)}}$$

Es decir, la mejor estimación de la incorporación es la media geométrica de las incorporaciones individuales I_i calculadas a partir de las medidas individuales.

$$I_i = \frac{N_i}{m(t_i)} \qquad (8.2)$$

La dosis efectiva comprometida se calcula multiplicando la mejor estimación de la incorporación ***I*** por el coeficiente de dosis correspondiente (dosis por unidad de incorporación) determinado con los mismos parámetros ***a priori*** que los utilizados en el cálculo de la mejor incorporación.

En el caso de varios conjuntos de datos, el cálculo de la mejor incorporación se hace según las ecuaciones (***5.5***) o (***5.6)*** en las que cada estimación individual de la incorporación I_i o I_j se evalúa mediante la ecuación (***8.2***) utilizando valores netos N_i en vez de valores directos de medida M_i (ver ***Apartado 5.3***).

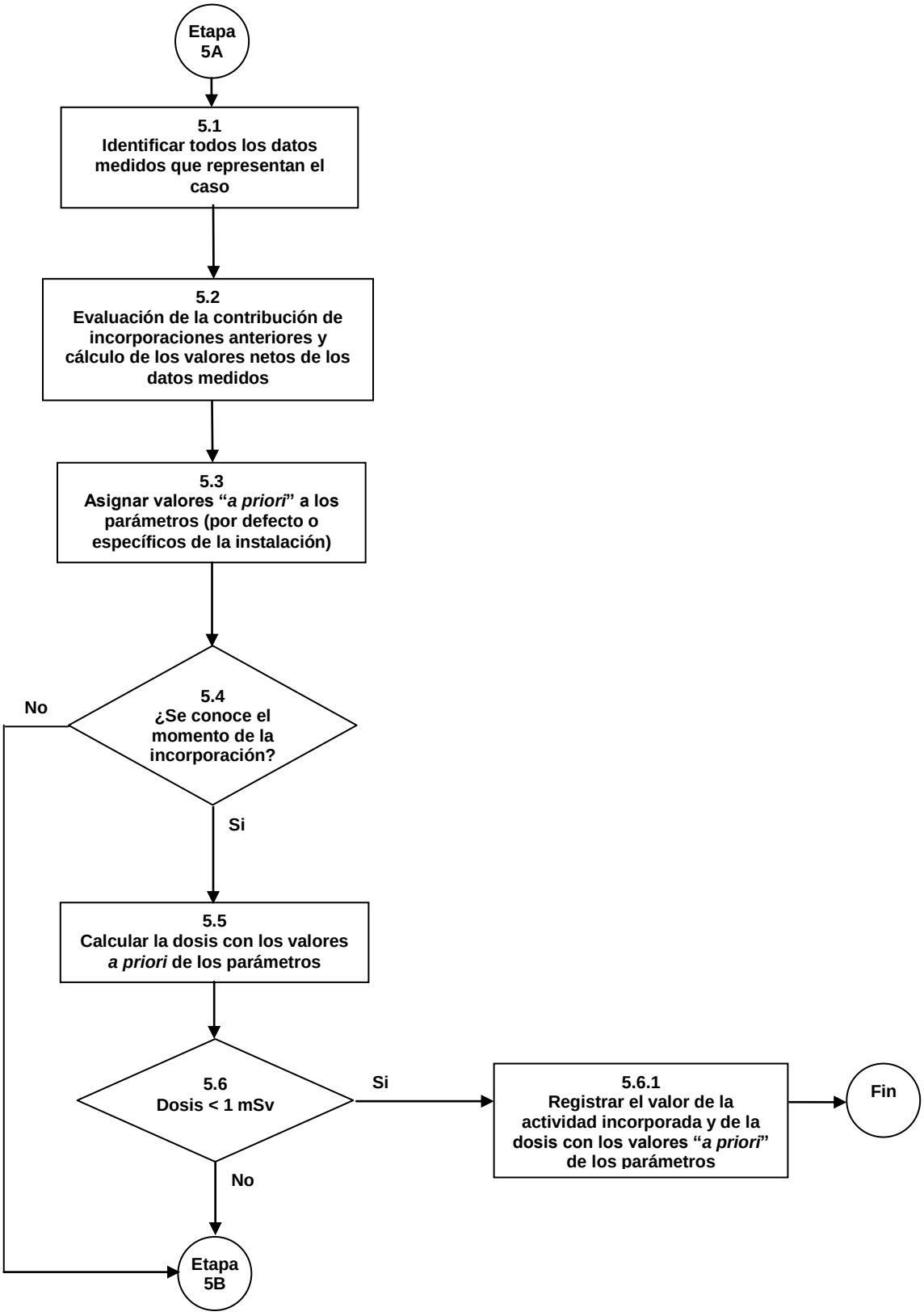


Figura 8.2 Etapa 5A. Procedimiento especial para casos de inhalación superior al Nivel 1 – Parte 1: Evaluación sencilla con valores *a priori* de los parámetros

Paso 5.6. Si la dosis efectiva estimada en el ***Paso 5.5*** anterior (habiendo tenido en cuenta todas las medidas disponibles) es ***menor de 1 mSv***, no hay necesidad de realizar una investigación más a fondo (***Paso 5.6.1***). En este caso el criterio de comparación será la dosis debida a la incorporación en cuestión, en vez de la dosis anual como en la ***Etapa 3.4***, puesto que para cualquier trabajador individual es improbable que se den varias incorporaciones que requieran de procedimientos especiales de evaluación. Si la ***dosis es mayor de 1 mSv***, se necesitan procedimientos especiales adicionales (***Etapa 5B***) para una evaluación más detallada del caso.

Paso 5.6.1. Registrar los resultados obtenidos de la actividad incorporada y de la dosis efectiva comprometida del ***Paso 5.6***, junto con los correspondientes valores de los parámetros del ***Paso 5.3***.

8.3 Parámetros asociados a la exposición (Etapa 5B)

En esta etapa se describen los procedimientos o los métodos que permiten modificar los tres parámetros principales relacionados con una inhalación: el ***AMAD***, el ***tipo de absorción*** y ***el momento de la incorporación,*** si es desconocido, utilizando datos de las medidas (***"a posteriori"***). Hay que hacer notar aquí que si se asignaron "***a priori***" (**Paso 5.3**) valores específicos a los parámetros referentes al tipo de absorción del material, no se deben utilizar ahora los valores por defecto de ***ICRP*** de los tipos de absorción en el caso de que sean distintos de los asignados "***a priori"*** (***Pasos 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14***), hay que utilizar los mismos que se asignaron ***a priori***. Si no se obtiene un ajuste aceptable con los valores de los parámetros asignados "***a priori***", se podrán modificar "***a posteriori***" en la ***Etapa 5C***.

En esta etapa y en la que sigue, ***5C***, los valores de los diferentes parámetros se seleccionan en base al ajuste entre las predicciones del modelo y los datos observados. Los criterios para rechazar un ajuste se han indicado en el ***Apartado 6.3*** lo que ayudará a decidir si se finaliza la evaluación o se continúa con pasos adicionales.

Paso 5.7. ***¿Hay suficientes datos?*** Como ya se ha indicado en la introducción, el criterio para decidir si el número (y tipos) de datos disponibles son suficientes, así como la duración del periodo de vigilancia, depende de la dosis. En este paso, el número de datos disponibles para el rango de dosis de ***1 mSv < D < 6 mSv*** será normalmente apropiado porque este procedimiento especial de evaluación se ha iniciado con la hipótesis de que la dosis iba a ser superior a ***1 mSv***. Dosis superiores a ***6 mSv*** se consideran en los ***Pasos 5.11.2*** y ***5.12.2*** posteriores.

Paso 5.7.1. ***Obtener nuevos datos de medidas***. Se está suponiendo que la evaluación se está llevando a cabo en tiempo real, de manera que existe la posibilidad de obtener nuevas medidas adicionales si las disponibles son insuficientes. (Para casos históricos, en donde no es posible conseguir más medidas, se registrará que los datos son insuficientes, y, por tanto, el resultado final deberá ser tratado con cautela.) Una vez obtenidos nuevos datos, se realizará de nuevo una evaluación sencilla según la ***Etapa 5A***.

Paso 5.8. ***¿Se conoce el momento de la incorporación?*** Según se indica en la introducción, hay dos principales rutas alternativas a través de esta etapa del proceso dependiendo de si se conoce o no el momento de la incorporación. Generalmente se emplean procedimientos especiales de evaluación tras la

identificación de un incidente para el que se conoce el momento de la incorporación: se siguen los ***Pasos 5.9*** a ***5.11***, y si es necesario, el ***Paso 5.13***. Sin embargo se puede dar el caso de descubrirse incorporaciones anteriores no identificadas a través por ejemplo, de una vigilancia rutinaria, para las que no se conoce o se conoce solo dentro de un cierto margen el momento de la incorporación. En estos casos se seguirá el ***Paso 5.12***, y si es preciso el ***Paso 5.14***, pero entonces hay pocas posibilidades de caracterizar "***a posteriori***" el material. Si los resultados de las medidas de bioensayo que se tomen a continuación no decrecen con el tiempo, será difícil, en la práctica, estimar el momento de la incorporación. En estos casos se recomienda suponer que el momento de la incorporación ocurrió en el punto medio del intervalo de vigilancia.

Paso 5.9. ***¿Se dispone de datos tempranos de actividad en pulmones y heces?*** Durante los pocos primeros días tras una inhalación de un material relativamente insoluble (***Tipo M o Tipo S)***, la mayor parte de la actividad se encuentra en las vías respiratorias, o está siendo eliminada por el tracto GI a través de las heces. En situaciones de este tipo con una posible incorporación importante, sería deseable disponer de medidas de pulmones y heces. Si se dispone de ambas medidas (actividad acumulada en heces durante los primeros días y de medidas que permitan estimar el depósito inicial de la actividad pulmonar) se puede hacer una estimación del ***AMAD*** efectivo (***Paso 5.10***). Alternativamente, si no se dispone de medidas de la actividad pulmonar se pueden utilizar las de la actividad corporal junto con las de heces para determinar el tamaño ***AMAD*** efectivo (***Paso 5.10***).

Paso 5.10. ***Determinar el AMAD efectivo a partir de los datos iniciales de actividad en pulmones y heces***. Aunque los trabajos experimentales de determinación de tamaños de partículas (***AMAD***) en los lugares de trabajo (p.e *Dorrian y Bailey 1995*) confirman de forma genérica los postulados de las publicaciones ***66/68*** de ***ICRP*** de considerar un tamaño por defecto de ***5 micras*** para exposición ocupacional, también han observado un amplio abanico de tamaños de partículas (entre ***1 y 20 micras***). Si se ha caracterizado bien la contaminación ambiental en el lugar de trabajo será posible entonces utilizar valores más realistas de los tamaños involucrados a partir de las medidas de la distribución de tamaños de la actividad. Alternativamente, si se dispone de medidas tempranas de bioensayo, es posible también inferir ***a posteriori*** un ***AMAD*** "***efectivo***" a partir de las medidas disponibles. El principal efecto del tamaño de aerosol es ***determinar la actividad relativa depositada*** (***i***) en el ***tracto respiratorio superior*** (zonas extratorácicas de paso de aire ***ET,*** bronquios ***BB*** y bronquiolos ***bb***) que si no es absorbida en sangre, será transportada al tracto gastrointestinal y desde ahí eliminada en heces en unos pocos días, y (***ii***) en el ***tracto respiratorio inferior*** (zona alveolar-intersticial ***AI***) que se transporta lentamente desde los pulmones. De acuerdo con la ***Guía Soporte 3*** de ***ICRP*** (***ICRP Supporting Guidance 3***) (*ICRP 2002b*), para inhalaciones de material relativamente insoluble (***Tipos M*** y ***S***) y para el trabajador expuesto (trabajador de referencia), existe una relación casi lineal para el cociente entre la actividad acumulada en heces durante los 3 primeros días ($H_{1\text{-}3}$) y la actividad en pulmones al cabo del tercer día (P_3) para valores de ***AMAD*** comprendidos entre **1** y ***10 micras***. Esto se representa en la ***figura 8.3*** para el caso del ***Am-241***. Por ello este cociente experimental determinado a partir de las medidas disponibles puede servir para inferir el ***AMAD*** "***efectivo***". El concepto de "***efectivo***" procede de que el cociente no solo está determinado por el tamaño de las partículas sino también por los hábitos de respiración (especialmente si se respira por la boca) y por la variabilidad biológica de los individuos de la deposición fecal.

Se prefiere este método para determinar el tamaño del ***AMAD*** en vez de el de las medidas "***a priori"*** del ***AMAD*** porque tiene en cuenta estos aspectos particulares de los individuos.

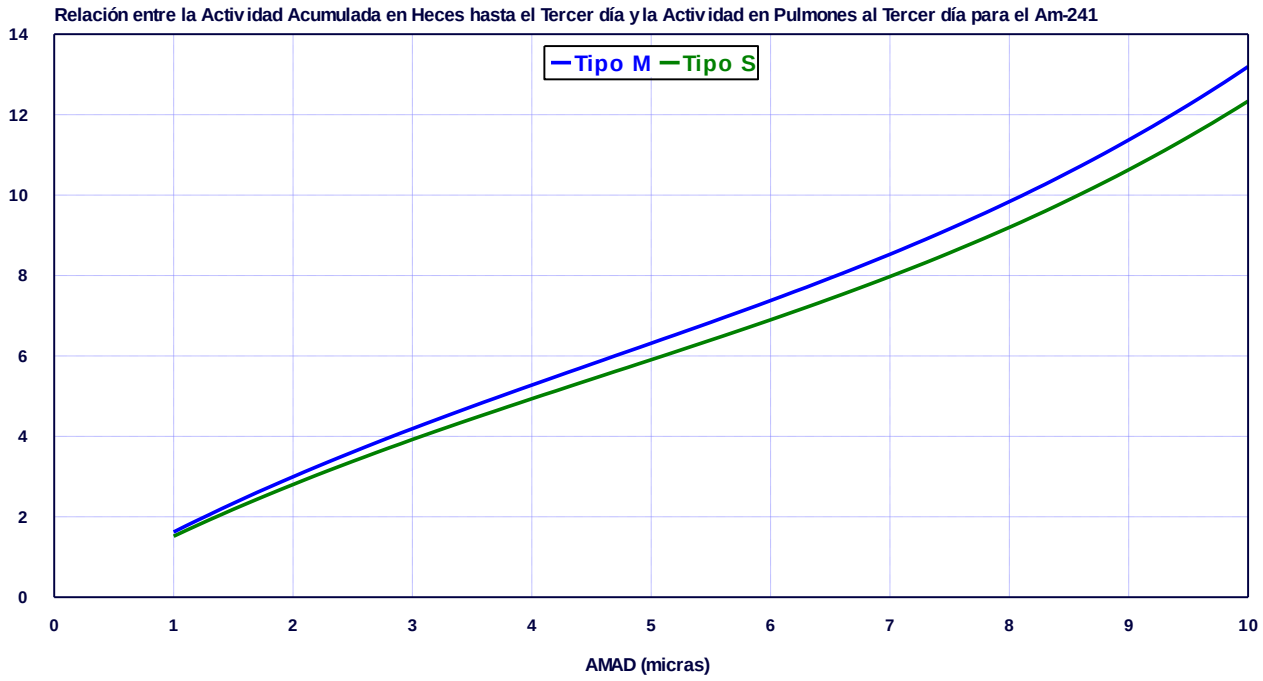


Figura 8.3 Variación con el AMAD efectivo de la relación entre la actividad acumulada en heces hasta el tercer día con la actividad en pulmones al tercer día para el Am-241 según las predicciones el modelo HRTM de ICRP-66 para el trabajador expuesto de referencia

Una evaluación semejante se ha hecho también para el ***U-235*** (*CONRAD, 2008*). Se encontró que el comportamiento del cociente entre la actividad acumulada en heces desde el día 1 al día 3 y la actividad en pulmones en el tercer día era similar al del ***Am-241***.

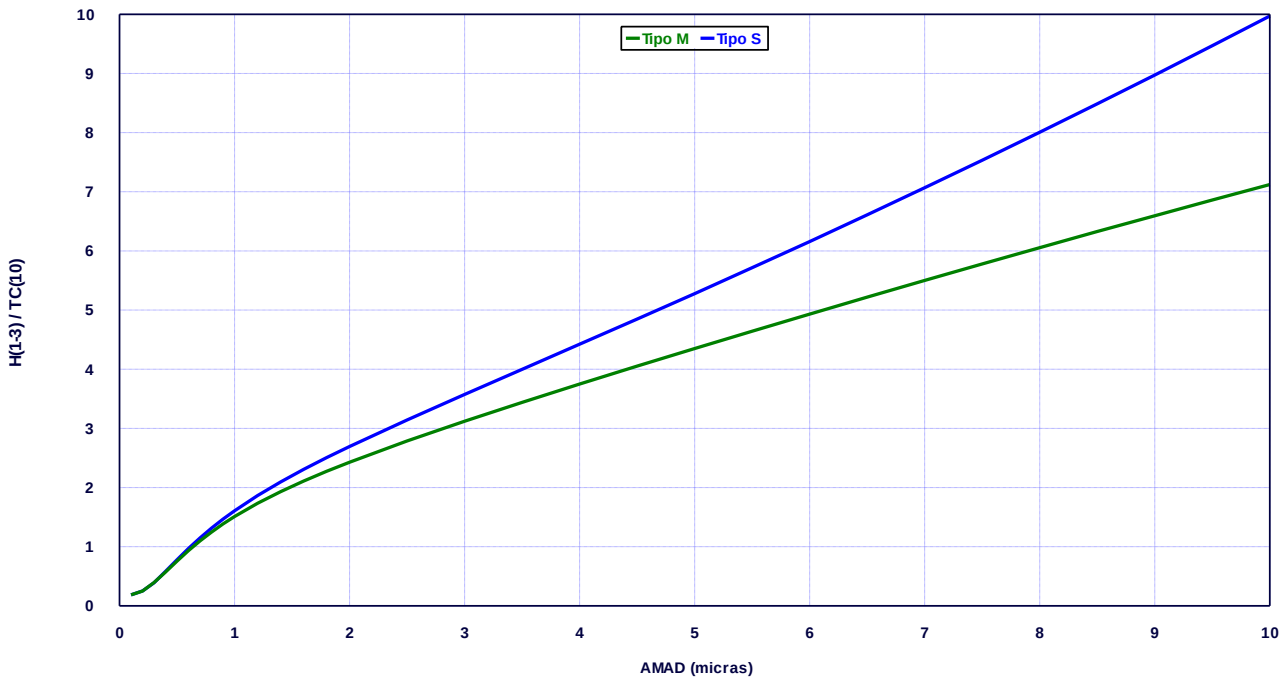
Para ayudar en la evaluación del ***AMAD efectivo***, las predicciones del cociente de actividades $H_{1\text{-}3}/P_3$ del modelo ***HRTM*** se han ajustado a una función polinómica para diferentes radionucleidos (***Tabla 8-1***). Se ha usado un polinomio de tercer grado del tipo $y = ax + bx^2 + cx^3$ (*CONRAD, 2008*). En el ajuste, ***y*** es el cociente de actividades $H_{1\text{-}3}/P_3$ y ***x*** el ***AMAD*** efectivo. La ***Tabla 8.1*** muestra los valores de los coeficientes de la función polinómica de ajuste así como el coeficiente de correlación (***R***)

Tabla 8.1 Tabla resumen de los coeficientes de la función polinómica de ajuste $y = ax + bx^2 + cx^3$ en la que "y" representa el cociente de actividades $H_{1\text{-}3}/P_3$ y "x" es el AMAD efectivo

Radionúclido	Tipo de Absorción	f1	a	b	c	R
Am-241	M	0,0005	1,7665	-0,1567	0,0112	0,9995
Am-241	S	0,0005	1,6537	-0,1470	0,0105	0,9995
U-235	M	0,02	1,7321	-0,1536	0,0110	0,9995
U-235	S	0,002	1,6513	-0,1468	0,0105	0,9995

Marsh et al. 208 extendieron este trabajo para considerar casos de Co-60 en los que no se disponga de medidas de actividad en pulmones pero si en todo el cuerpo (*CONRAD, 2008*). En estos casos la medida en todo el cuerpo al cabo de ***10 días*** (***TC_{10}***) se utiliza para inferir la actividad inicial depositada en el tracto respiratorio inferior para materiales relativamente insolubles. Para tiempos posteriores a ***10 días*** toda la actividad de la región ***ET1*** habrá sido eliminada por espiración nasal y la mayor parte de la actividad del tracto gastrointestinal también habrá sido excretada, por lo que casi toda la actividad medida de cuerpo entero estará depositada en la región inferior del tracto respiratorio. Por ello se puede utilizar también el cociente de actividades ***$H_{1\text{-}3}/TC_{10}$*** para estimar el ***AMAD efectivo*** para materiales relativamente insolubles. La ***Figura 8.4*** representa la variación de este cociente ***$H_{1\text{-}3}/TC_{10}$*** con el tamaño ***AMAD Co-60*** tipos ***M*** y ***S***.

Figura 8.4 Relación entre la actividad acumulada en heces hasta el tercer día ($H_{1\text{-}3}$) y la actividad en todo el cuerpo al cabo de 10 días (TC_{10}) en función del AMAD para el Co-60 y tipos de absorción M y S



Paso 5.11. ***Evaluación de la dosis ajustando el tipo de absorción (F, M o S)***. Hay que hacer notar aquí que si se asignaron "***a priori***" (***Paso 5.3***) valores a los parámetros específicos de absorción del material, no se deben utilizar aquí o en el ***Paso 5.13*** valores por defecto de los tipos de absorción distintos de los asignados "***a priori***" y si con los valores asignados "***a priori***" de esos parámetros no se obtiene un ajuste aceptable se podrán modificar "***a posteriori***" en la ***Etapa 5C***.

De acuerdo con la información disponible, el ***AMAD*** se ha determinado como: ***valor por defecto de 5 µm***, caracterización "***a priori***" o determinación "***a posteriori***". La otra característica fundamental del material

inhalado es el ***tipo de absorción***. En el ***Paso 5.3*** se ha hecho una asignación "***a priori***" del tipo de absorción de acuerdo a las recomendaciones de los documentos ***OIR*** de ***ICRP*** o de la publicación ***68*** de ***ICRP*** basándose en lo que se pueda conocer de la forma química del material inhalado. Utilizando este tipo de absorción por defecto, se comprueba la bondad del ajuste (***Apartado 6.3***). Si el ajuste es aceptable se calcula entonces la dosis con los mismos valores de parámetros que los utilizados en la evaluación de la incorporación, y el proceso se traslada al ***Paso 5.11.2***, etc. Si el ajuste no es correcto, entonces se debe probar con otros tipos distintos de absorción como sigue a continuación.

Los tipos de absorción por defecto de ICRP para materiales en forma de partículas: ***F (rápido)***, ***M (moderado)*** y ***S (lento)***, representan cada uno de ellos un amplio rango de tasas de absorción. Puede haber grandes diferencias entre el comportamiento real de absorción de un material y el que se supone para el tipo por defecto al que es asignado, lo que puede afectar en gran medida a la retención pulmonar y a la excreción urinaria. Se repetirá la evaluación con otros tipos disponibles de absorción para el elemento distintos de los utilizados anteriormente y en cada nueva evaluación se realizará una prueba de la bondad del ajuste (***Apartado 6.3***). Si el ajuste es aceptable se calcula la dosis con este mismo tipo de absorción y resto de parámetros y se va de nuevo al ***Paso 5.11.2***. Si se obtienen ajustes aceptables con más de un tipo de absorción, se elegirá como mejor ajuste aquel que tenga el mayor ***p-valor*** siempre que también el ajuste sea bueno a ojos del evaluador.

Paso 5.11.1. ***¿Es aceptable la bondad del ajuste?*** Si la bondad de ajuste es aceptable (es decir el ajuste no es rechazado por los criterios del ***Apartado 6.3***), entonces la estimación de la incorporación se toma como su mejor estimación. De lo contrario, harán falta procedimientos especiales adicionales para realizar una evaluación más detallada del caso (***Paso 5.13*** y siguientes).

Paso 5.11.2. ***¿Es la dosis inferior a 6 mSv?*** Si la dosis efectiva estimada en el ***Paso 5.11*** es inferior a ***6 mSv***, no hay necesidad de realizar una investigación más a fondo (***Paso 5.11.3***). Pero si la dosis es superior a ***6 mSv***, entonces se necesitan procedimientos especiales adicionales para una evaluación más detallada del caso (***Paso 5.11.4***, y siguientes).

Paso 5.11.3. ***Registrar los resultados de la actividad incorporada y de la dosis efectiva comprometida del Paso 5.11*** junto con los correspondientes valores de los parámetros utilizados en la evaluación del ***Paso 5.11***.

Paso 5.11.4. ***Comprobar que existen datos suficientes y obtener más en caso necesario***. Esto es similar a los ***Pasos 5.7*** y ***5.7.1***. El criterio para definir el número (y el tipo) de datos "***suficientes***", la duración de la vigilancia, etc., va en función del nivel de dosis y se ha indicado en el ***Apartado 6.5***. En esta etapa se considera que el número apropiado de datos es el correspondiente a una dosis mayor de ***6 mSv***.

La adquisición nuevos datos de medidas supone implícitamente que la evaluación se está llevando a cabo en tiempo real, de manera que existe la oportunidad de obtener nuevas medidas adicionales si las disponibles anteriores son insuficientes. (Para casos históricos, en donde ya no es posible conseguir más medidas, se registrará que los datos son insuficientes, y, por tanto el resultado final de dosis deberá ser

tratado con cautela). Una vez obtenidos nuevos datos, se necesitan procedimientos especiales adicionales (***Paso 5.13 y siguientes***) para una evaluación más detallada del caso.

Paso 5.12. ***Evaluar la dosis ajustando simultáneamente el momento de la incorporación y el tipo de absorción***. Hay que resaltar que a este paso se llega desde el ***Paso 5.8*** cuando el momento de la incorporación es desconocido. En ese ***Paso 5.8***, el ***AMAD*** ha sido fijado de acuerdo con la información disponible: ***AMAD por defecto de 5 µm*** o caracterización "***a priori***". Hay que hacer notar aquí que si se asignaron *"**a priori**"* valores para los parámetros específicos de absorción del material (***Paso 5.3***), no se deben utilizar aquí valores ***por defecto*** de los tipos de absorción distintos de los asignados "***a priori***" y si con estos valores "***a priori***" de esos parámetros no se obtiene un ajuste aceptable se podrán modificar *"**a posteriori**"* en la ***Etapa 5C***.

La otra característica fundamental del material inhalado es el tipo de absorción. En el ***Paso 5.3*** se ha hecho una asignación "***a priori***" del tipo de absorción de acuerdo a las recomendaciones de los documentos ***OIR*** o de la publicación de ***68*** de ***ICRP*** basándose en los datos disponibles de la forma química del material inhalado. Utilizando este tipo de absorción por defecto y el momento de la incorporación también por defecto como en el ***Paso 3.2*** (punto medio del periodo de vigilancia, es decir el punto medio entre la medida actual y la anterior medida o entre la medida actual y el principio del periodo de vigilancia), se comprueba la bondad del ajuste (***apartado 6.3***). Si el ajuste es aceptable se calcula entonces la dosis con los mismos valores de parámetros que los utilizados en la evaluación de la incorporación, y el proceso se traslada al ***Paso 5.12.2***, etc. Si el ajuste no es correcto, entonces se debe probar con otros tipos de absorción y momentos distintos de la incorporación como se indica en los párrafos siguientes. Sin embargo, si no se observa en las medidas tempranas que se hagan, una disminución de la actividad, será difícil en la práctica poder estimar el momento de la incorporación y en estos casos se recomienda suponer que el momento de la incorporación se corresponde con el punto medio del intervalo de vigilancia.

Los tipos de absorción para material inhalado en forma de partículas, establecidos por defecto por ***ICRP***, ***F (Rápido)***, ***M (moderado)*** y ***S (lento)*** representan un amplio rango de tasas de absorción. Puede haber grandes diferencias entre el comportamiento real de absorción del material en particular y el supuesto por defecto que asigna el modelo de ***ICRP***, lo que puede afectar en gran medida a la retención pulmonar y a la actividad excretada en heces. Por tanto habrá que repetir la evaluación con cada uno de los tipos de absorción por defecto disponibles para el elemento en cuestión y con diversos momentos de la incorporación abarcando todo el posible periodo o intervalo de la incorporación. En cada nueva evaluación se realizará una prueba de la bondad del ajuste (***Apartado 6.3***).

Si se encuentra un ajuste aceptable, es probable que también se encuentren ajustes aceptables para otros momentos diferentes de la incorporación y por tanto se escogerá aquella combinación de tipo de absorción y momento de la incorporación que proporcione el mejor ajuste (aquel que tenga el mayor ***p-valor*** siempre que también el ajuste sea bueno a ojos del evaluador). La dosis se calcula entonces con los mismos parámetros utilizados en la determinación de la incorporación y se va al ***Paso 5.12.2***.

Paso 5.12.1. ***¿Es aceptable la bondad del ajuste?*** Si la bondad de ajuste es aceptable (es decir el ajuste no es rechazado por los criterios del ***Apartado 6.3***), entonces la estimación de la incorporación se toma como

su mejor estimación. De lo contrario, hacen falta procedimientos especiales adicionales para realizar una evaluación más detallada del caso (***Paso 5.14***, en adelante).

Paso 5.12.2. *¿Es la dosis inferior a 6 mSv?* Si la dosis efectiva estimada en el ***Paso 5.12*** es ***inferior a 6 mSv***, no hay necesidad de realizar una investigación más a fondo (***Paso 5.12.3***). Pero si la dosis es superior a ***6 mSv***, entonces se necesitan procedimientos especiales adicionales para una evaluación más detallada del caso (***Paso 5.12.4 en adelante***).

Paso 5.12.3. *Registrar los resultados de la actividad incorporada y de la dosis efectiva comprometida del Paso 5.12* junto con los correspondientes valores de los parámetros utilizados en la evaluación del ***Paso 5.12***.

Paso 5.12.4. *Comprobar si hay suficientes datos y obtener más en caso necesario*. Esto es similar a los ***Pasos 5.7*** y ***5.7.1***. El criterio para definir el número (y el tipo) de datos "***suficientes***", la duración de la vigilancia, etc., va en función del nivel de dosis y se ha indicado en el ***Apartado 6.5***. En esta etapa se considera que el número apropiado de datos es el que corresponde a una dosis > ***6 mSv***.

La adquisición nuevos datos de medidas supone implícitamente que la evaluación se está llevando a cabo en tiempo real, de manera que sí existe la oportunidad de obtener nuevas medidas adicionales si las disponibles anteriores son insuficientes. (Para casos históricos, en donde ya no es posible conseguir más medidas, se registrará que los datos son insuficientes, y, por tanto el resultado final de dosis deberá ser tratado con cautela). Una vez obtenidos nuevos datos, se necesitan procedimientos especiales adicionales (***Paso 5.14 y siguientes***) para una evaluación más detallada del caso.

Paso 5.13. *Evaluar la dosis ajustando los datos con una mezcla de tipos de absorción*. Esto es una extensión del ***Paso 5.11***, para dar una mayor flexibilidad al ajuste al considerar una mezcla de tipos de absorción.

A este ***Paso 5.13*** se puede haber llegado desde el ***Paso 5.11.1*** porque no se obtuvo un ajuste aceptable con un único tipo de absorción. Ahora hay que probar con distintas mezclas de tipos de absorción por el método de prueba y fallo. Si se obtiene más de un ajuste aceptable (***Etapa 5C, Paso 5.15***), la mezcla de tipos de absorción que proporcione el mejor ajuste será la que se elija (aquel que tenga el mayor ***p-valor*** siempre que también el ajuste sea bueno a ojos del evaluador).

Alternativamente, se puede haber llegado a este paso desde los ***Pasos 5.11.1 y 5.11.2***, porque la dosis estimada fue mayor de ***6 mSv***, y además se pueden haber obtenido más medidas (datos). Si esto es así, se deberán repetir cuantos pasos sean necesarios de este procedimiento evaluando por este orden: con el tipo de absorción *"**a priori**"* por defecto; con otro tipo de absorción y con una mezcla de tipos de absorción, hasta obtener un ajuste adecuado.

Paso 5.14. *Evaluar la dosis ajustando simultáneamente el momento de la incorporación y el tipo de absorción*. Esto es una extensión del ***Paso 5.12*** para dar más flexibilidad al ajuste considerando una mezcla de tipos de absorción. Hay que hacer notar aquí que si se asignaron "***a priori"*** valores a los parámetros específicos para el tipo de absorción del material (***Paso 5.3***), no se deben utilizar aquí valores por defecto

de los tipos de absorción distintos de los asignados "***a priori***" y si con estos valores de parámetros asignados "***a priori***" no se obtiene un ajuste aceptable, se podrán modificar *"**a posteriori**"* en la ***Etapa 5C***.

A este paso se puede haber llegado desde el ***Paso 5.12.1*** porque no se obtuvo un ajuste aceptable con un único tipo de absorción y el momento de la incorporación. Ahora hay que probar con distintas mezclas de tipos de absorción. Si se obtiene más de un ajuste aceptable (***Etapa 5C, Paso 5.15)***, se elegirá la mezcla de tipos de absorción que proporcione el mejor ajuste. Si se encuentra un ajuste aceptable, es probable que también se encuentren ajustes aceptables para otros momentos diferentes de la incorporación y por tanto se escogerá aquella mezcla de tipo de absorción y momento de la incorporación que proporcione el mejor ajuste (aquel que tenga mayor ***p-valor*** siempre que también el ajuste sea bueno a ojos del evaluador).

Alternativamente, se puede haber llegado a este paso desde los ***Pasos 5.12.1*** y ***5.12.2***, porque la dosis estimada era mayor de ***6 mSv*** y además se pueden haberse obtenido más medidas (datos). Si es así, se deberán repetir cuantos pasos sean necesarios de este procedimiento evaluando por este orden: con el tipo de absorción y momento de la incorporación por defecto *"**a priori**"*; con todos los tipos de absorción y diversos momentos de la incorporación y con una mezcla de tipos de absorción y momentos de la incorporación hasta obtener un ajuste adecuado (el que proporcione un valor mayor del ***p-valor*** siempre que también el ajuste sea bueno a ojos del evaluador).

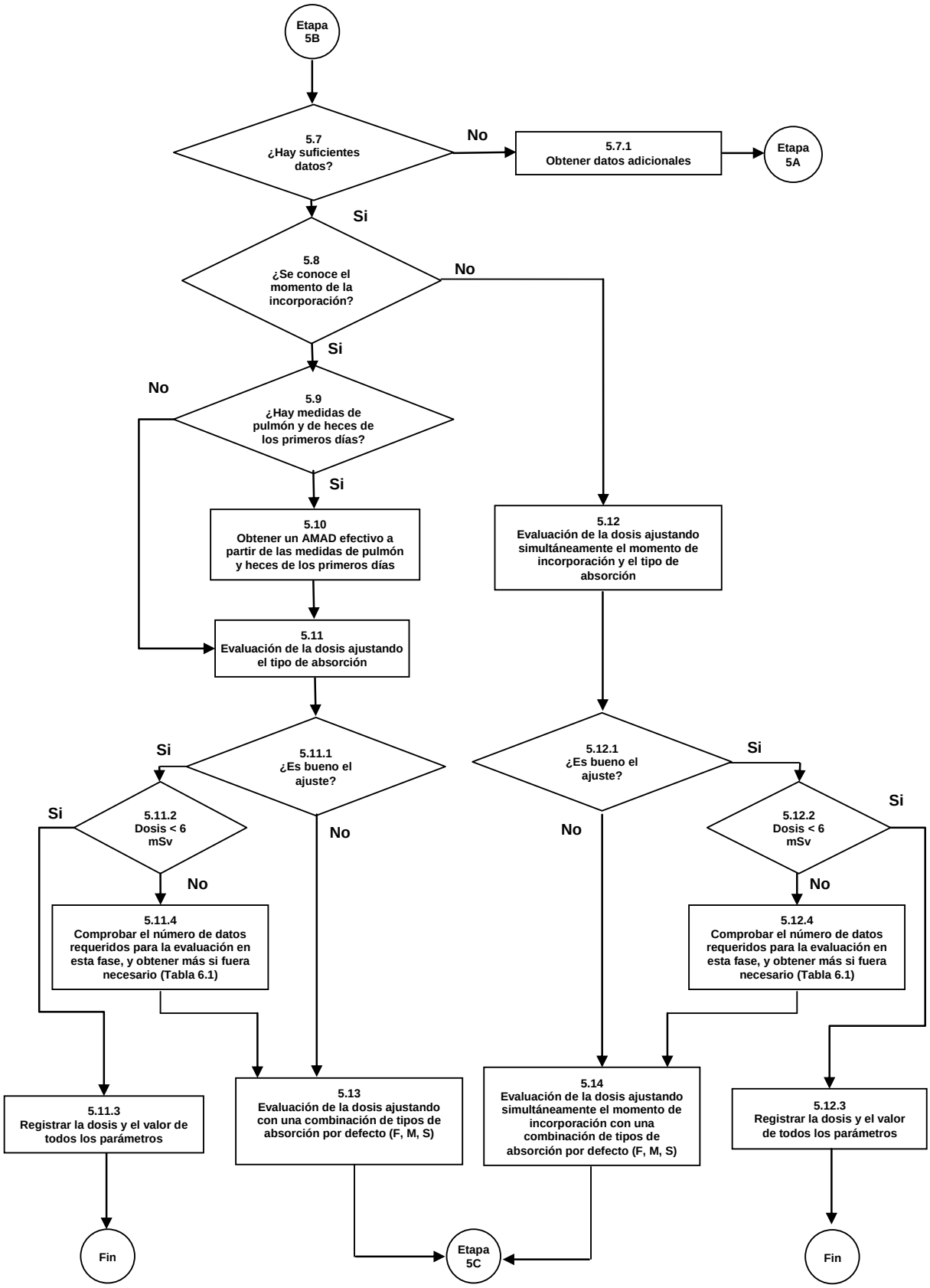


Figura 8.5 Etapa 5B. Procedimiento especial para casos de inhalación superior al Nivel 1 – Parte 2: Modificación del AMAD y del tipo de absorción, y del momento de la incorporación si esdesconocido

8.4 Evaluación avanzada (Etapa 5C)

En esta etapa se lleva a cabo una evaluación avanzada de la incorporación y dosis. Se aplica en aquellos casos en los que se dispone de abundantes o suficientes datos. El aspecto fundamental de esta etapa es que se ajustan de forma sistemática y en un orden específico los valores de los parámetros de los modelos biocinéticos de ***ICRP*** hasta obtener un ajuste aceptable (el ajuste no es rechazado por los criterios del ***Apartado 6.3***). Si el ajuste es aceptable se acepta la estimación de la incorporación como su mejor estimación y la dosis equivalente comprometida para todos los órganos y la dosis efectiva comprometida se calculan con los mismos valores de parámetros que los utilizados en la estimación de la incorporación.

Se registran estos resultados de la incorporación y de la dosis efectiva comprometida junto con los correspondientes valores de los parámetros (***Paso 5.15.1***). Habrá que indicar si se ha utilizado algún parámetro específico del individuo y en este caso la dosis efectiva comprometida no podrá estar referida a la ***Persona de Referencia*** (ver ***Apartado 1.2.1***).

Por tanto, después de cada paso en el que se modifique el valor de algún parámetro (***Pasos 5.17*** a ***5.22***), hay un paso correspondiente (***Pasos 5.17.1*** a ***5.22.1*** respectivamente) para comprobar la bondad del ajuste, todo ello de forma similar al ***Paso 5.15*** por lo que no se incluye aquí texto explicativo.

Si no se conoce el momento de la incorporación debería haberse evaluado al inicio de esta etapa ajustando el modelo biocinético a los datos de las medidas con una mezcla de tipos de absorción (***Paso 5.12***). Ahora bien, ***si en los pasos posteriores se modifica cualquiera valor de los parámetros del modelo, habrá que reevaluar el momento de la incorporación***.

Se recomienda que si se dispone de varios tipos de medidas de bioensayo (medidas directas e indirectas de orina y/o heces), se calcule la actividad incorporada y la dosis ajustando simultáneamente todos los tipos de medidas con las predicciones de los diferentes modelos biocinéticos correspondientes.

Paso 5.15. ***¿Es aceptable la bondad del ajuste?*** Si la bondad del ajuste es aceptable (es decir el ajuste no es rechazado por los criterios del ***Apartado 6.3***), se acepta la estimación de la incorporación como su mejor estimación. Se calcula la dosis efectiva con los mismos valores de los parámetros del modelo empleados en la estimación de la incorporación. Si el ajuste no es aceptable se va al ***Paso 5.16***.

Paso 5.16. ***Determinar valores específicos para los parámetros de absorción del modelo respiratorio HRTM***. Para materiales moderadamente solubles a muy insolubles (de los ***Tipos M*** o ***S***) determinar valores específicos para f_r y s_s ajustando f_r, s_s y la incorporación a los datos, manteniendo s_r fijo en el valor recomendado los documentos ***OIR*** de ***ICRP*** o en la ***Publicación 68*** de ***ICRP***. Para la mayoría de los materiales no hay evidencia de que exista el estado ligado, por lo que fracción f_b se toma igual a ***0***. De todas formas si se hubieran determinado a través de experimentos ***in vivo*** valores para s_r y/o de f_b y s_b, se utilizarán estos valores experimentales.

Paso 5.17. ***Determinar un valor específico para f_A o en su ausencia para f_1***. En general, no se justifica modificar f_1 así como tampoco los parámetros de absorción del modelo pulmonar (***HRTM***). Sin embargo a veces para la inhalación de materiales relativamente insolubles es necesario reducir el valor de f_1 de forma

que las actividades sistémicas o las tasas de excreción urinaria que predicen los modelos sean consistentes con los datos experimentales.

Paso 5.18. ***Determinar valores específicos para las tasas de transporte de partículas del modelo pulmonar (HRTM)***. Los valores de los parámetros que describen el transporte de partículas en el tracto respiratorio del modelo ***HRTM*** se fundamentan en la medida de lo posible en datos humanos experimentales lo que permite determinar las tasas de transporte de la actividad depositada en pulmones hasta un año o más posterior a la inhalación. Sin embargo estos valores fueron escogidos para representar individuos sanos y no fumadores. Los datos experimentales que sirvieron de partida muestran grandes variaciones inter-personales aún entre sujetos sanos y muestran que el transporte pulmonar es generalmente menor entre fumadores y personas con enfermedades pulmonares (*Publicación 66 de ICRP 1994*). Si se dispone de suficientes medidas de actividad en pulmones y/o de excreción fecal, puede ser necesario modificar las tasas de transporte de partículas para mejorar el ajuste de los datos.

Cabe señalar que la modificación de las tasas de transporte de partícualñs también afecta a la actividad absorbiad en sangre debido a que el transporte de la actividad depositada en pulmones se reparte entre la absorción en sangre y el transporte al aparato digestivo. Así, en algunos casos, podrá ser necesario reajustar los parámetros de absorción del modelo ***HRTM*** (es deceir, repetir el paso ***5.16***) tras modificar las tasas de transporte de partículas.

Paso 5.19. ***Determinar valores específicos para los tiempos de tránsito del modelo del Tracto Alimentario***. Los valores de los parámetros del modelo alimentario de ***ICRP*** - ***HATM*** (*ICRP 2006*) representan valores típicos por lo que puede haber considerables variaciones intra e inter-individuos. La modificación de los tiempos de tránsito afecta a la actividad retenida en todo el cuerpo y a la actividad eliminada en heces durante los primeros días tras una incorporación por inhalación o ingestión. Si se dispone de suficientes datos en estos primeros días, puede ser necesario modificar los tiempos de tránsito del modelo ***GI*** para obtener un mejor ajuste de los datos con las predicciones del modelo.

Paso 5.20. ***Ajustar valores de los parámetros de los modelos biocinéticos sistémicos***. De nuevo, los valores de los parámetros que recomienda ***ICRP*** fueron escogidos para representar valores medios de la población por lo que se pueden dar variaciones entre individuos que den lugar a diferencias entre los valores que predicen los modelos y las medidas, con independencia del modelo de que se trate, ya sea del modelo biocinético pulmonar o del tracto alimentario. Esto puede ocurrir con materiales muy solubles en los que el transporte de partículas apenas tiene efecto. Por ejemplo, los periodos biológicos de retención para incorporaciones de ***Tritio*** o de las formas solubles de ***Cesio*** (*ICRP, 1989*) varían entre individuos y por ello, las predicciones de los modelos pueden diferir de las medidas de la actividad retenida en el cuerpo. También para actínidos con un número suficiente de datos disponibles, se pueden observar diferencias entre individuos y las predicciones de los modelos para la retención en hígado o huesos o entre la relación entre la actividad depositada en estos órganos y la actividad excretada en orina.

Hay que reseñar que este es el último paso, de modo que el ajuste de los parámetros de los modelos sistémicos sólo debe ser considerado tras haber modificado los parámetros de los modelos ***HRTM*** y ***HATM*** (***Pasos 5.18 y 5.19***). SI el ajuste final es aceptable, se registrarán los valores de la incorporación y dosis

efectiva comprometida junto con los valores de los parámetros que se han modificado de los modelos utilizados en la evaluación (***Paso 5.15.1***). Si la bondad del ajuste no es aceptable es decir el ajuste se rechaza por los criterios del ***Apartado 6.3***, ***IDEAS*** recomienda que se consulte a otros expertos.

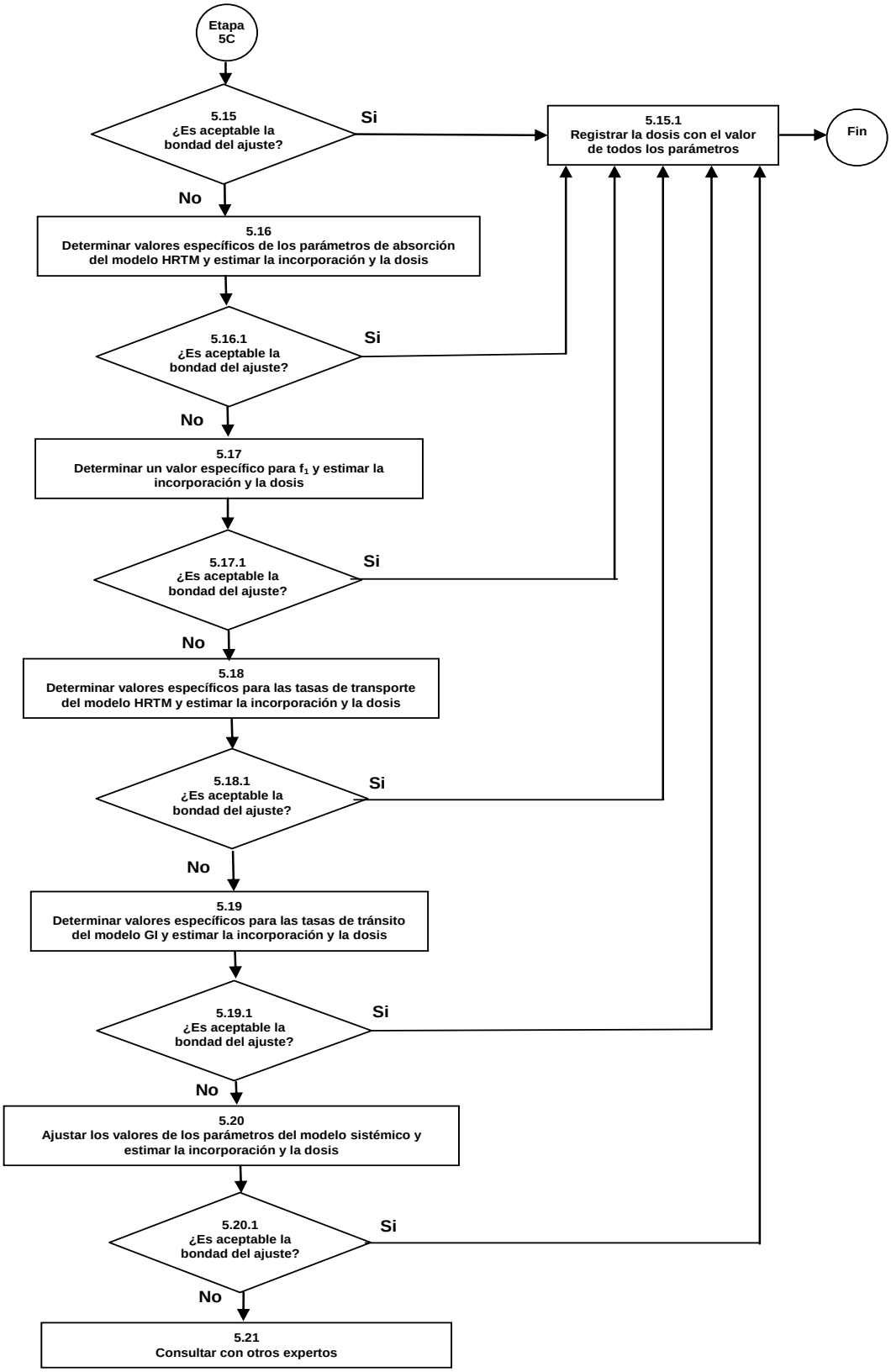


Figura 8.6 Etapa 5C. Procedimiento especial para casos de inhalación superior al Nivel 1 – Parte 3: Evaluación más sofisticada con ajuste sistemático de los valores de los parámetros de los modelos biocinéticos

9. Ingestión (Etapa 6)

9.1 Aspectos generales

Este procedimiento especial es análogo al descrito para la inhalación (***Capítulo 8***) y por ello aquí hay un cierto grado de repetición de ese capítulo. Se agrupa en tres etapas (ver el diagrama de flujo de la ***Figura 9.1***). En la primera (***Etapa 6A***) se realiza una evaluación sencilla utilizando valores escogidos ***"a priori"***: antes que la evaluación haya sido llevada a cabo. Este procedimiento es muy similar al procedimiento ***estándar*** de la ***Etapa 3***. La principal diferencia radica en que en un procedimiento especial debería haber más de una medida.

En la segunda etapa (***Etapa 6B***) se modifica el parámetro más relevante de la ingestión, el valor de f_A, es decir la fracción del material ingerido que es absorbido en sangre (*ICRP 2006*). Generalmente el valor de f_A es la suma de diferentes fracciones (p.e. f_{ST} desde el estómago y f_{SI} desde el intestino delgado). En ausencia de indicación para el valor de f_A se utilizará el valor de f_1 de la publicación ***68*** de ***ICRP*** (*ICRP 1994b*). Más aún, si se desconoce el momento de la incorporación, éste se ajustará utilizando los datos de las medidas (***"a posteriori"***).

En la tercera etapa (***Etapa 6C***) se lleva a cabo una evaluación más elaborada o avanzada y se aplica en aquellos casos en los que se dispone de suficientes datos. El aspecto fundamental de esta etapa es que aquí se pueden ajustar de forma sistemática y en un orden específico los valores de los parámetros de los modelos hasta obtener un ajuste aceptable (es decir el ajuste no es rechazado por los criterios del ***Apartado 6.3***).

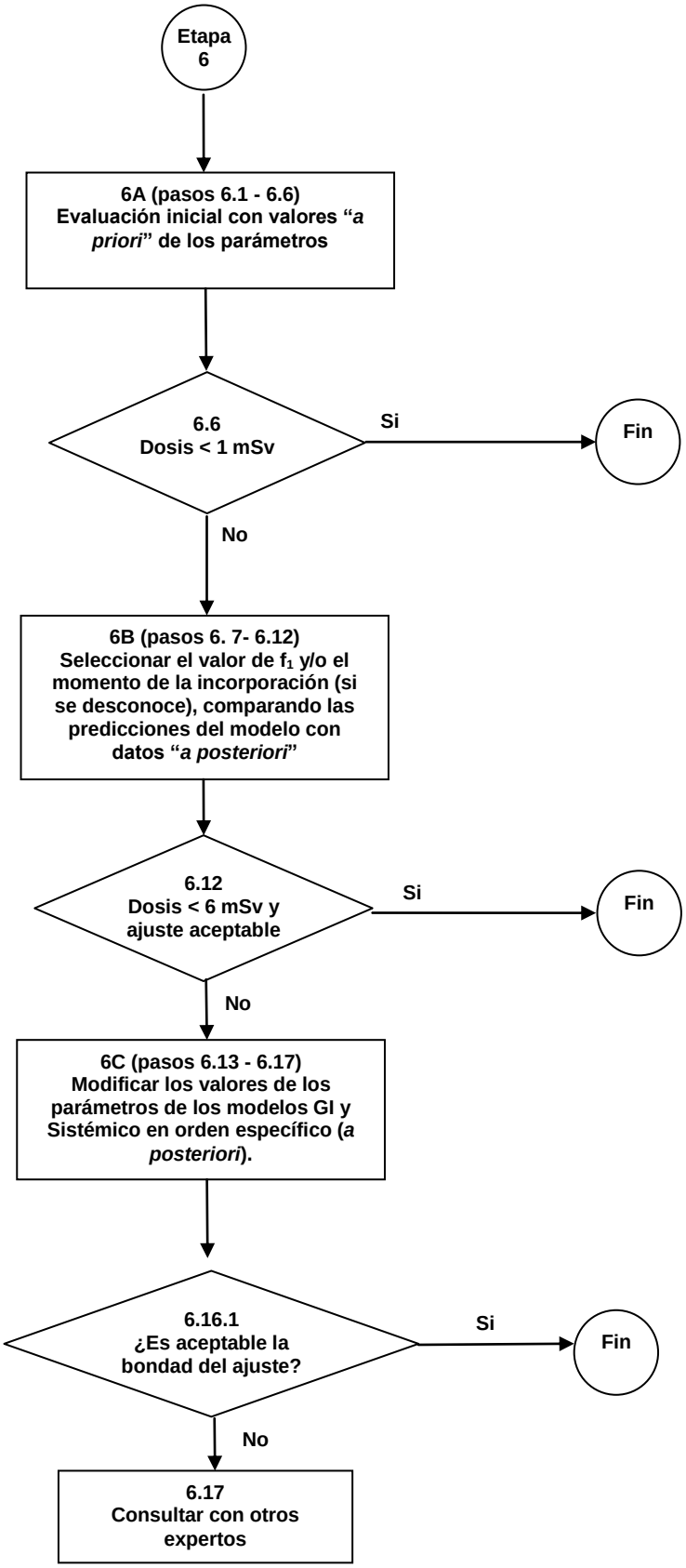


Figura 9.1 Etapa 6. Procedimiento especial para casos de ingestión superior al Nivel 1 – Vista general

9.2 Evaluación simple (Etapa 6A)

En esta etapa, se realiza una evaluación sencilla utilizando parámetros elegidos *"**a priori**"*: es decir, definidos antes de haber realizado la evaluación. El proceso es similar al procedimiento ***normal*** (***estándar***) de evaluación de la ***Etapa 3***. La principal diferencia radica en que en un procedimiento especial debe haber más de una medida.

Paso 6.1. ***Identificación y preparación de los datos de medida***. Se parte de la base de que habrá más de una medida disponible para esta evaluación especial (M_i para $i = 1$ hasta n). Por tanto es importante que las incertidumbres asignadas a los datos sean realistas ("***factor de dispersión***" ***SF***, ***Etapa 2.1***). Podría haber más de un tipo de medida (***orina***, ***heces***, etc.), y podría haber también medidas con más de un radionucleido involucrado en la exposición.

Explorar la posibilidad de que haya medidas fuera de rango empleando el método indicado en el ***Apartado 6.1***.

Paso 6.2. ***Contribuciones de anteriores incorporaciones*** (Como en el ***Paso 2.3***, para una sola medida). Se calculan, si es necesario, las contribuciones (P_i) de todas las incorporaciones anteriores teniendo en cuenta todas las posibles vías de incorporación y todas las mezclas de radionucleidosen las que se detectó el(los) radionucleido(s) en cuestión. Calcular los valores netos ($N_i = M_i - P_i$) de las medidas del radionucleido restando P_i del valor medido M_i.

Paso 6.3. ***Asignación de valores "a priori"*** (Como el ***Paso 3.2*** del procedimiento ***normal*** (***estándar***), ***Etapa 3***, a excepción del momento de la incorporación).

Se asignarán valores específicos del caso o de la instalación para los parámetros fundamentales de la evaluación si estuvieran disponibles. Tal información (*"**a priori**"*) deberá estar bien establecida y documentada. Algunos ejemplos de estos parámetros son: la fracción de la actividad ingerida que es absorbida en sangre, el parámetro f_A o f_1 (si ha sido determinada a través de un experimento apropiado in vivo, aunque esto es poco común), o el momento de la incorporación (si la exposición potencial está delimitada, o se sabe que es debida a un incidente conocido). Si, como ocurre normalmente, no se conocen los valores específicos de esos parámetros, se utilizarán los siguientes valores por defecto:

- Tipo de incorporación: ***Ingestión única***.
- Valor de f_A/f_1: ***Valores por defecto de los documentos OIR de ICRP o de la publicación 68 de ICRP***, ***Anexo E***.

Paso 6.4. ***Momento de la incorporación conocido/desconocido***. Si esta evaluación especial se inició a raíz de un incidente o suceso del que se tiene información (y por tanto el momento de la incorporación es conocido), entonces se llevará a cabo una evaluación sencilla (***Paso 6.5***) consistente con la evaluación ***estándar*** (***Etapa 3***). Si la evaluación especial se está llevando a cabo a raíz de una medida rutinaria inconsistente con medidas anteriores (***Paso 2.6***) o por una dosis superior a ***1 mSv*** resultante de una evaluación ***estándar*** (***Paso 3.4***) en la que lo más probable es que el momento de la incorporación no sea

conocido, habrá que aplicar entonces los procedimientos especiales de la ***Etapa 6B*** para conseguir una evaluación más detallada del caso.

Paso 6.5. (Como en el ***Paso 3.3*** del procedimiento ***estándar***, ***Etapa 3***, pero para más de una medida). Usando los valores asignados ***"a priori"*** de los parámetros, se obtiene la estimación de la incorporación I_i dividiendo el valor neto de la medida $N_i = M_i - P_i$ por la función apropiada de retención o de excreción $m_i(t)$. La media geométrica de los distintos valores I_i así obtenidos dará la mejor estimación de la incorporación (ver ***Paso 5.5***). Utilizando los mismos valores de los parámetros ***"a priori"*** se calcula la dosis efectiva comprometida multiplicando la "***mejor estimación***" de la incorporación por el coeficiente de dosis o coeficiente de dosis (dosis por unidad de incorporación).

Paso 6.6. Si la dosis efectiva estimada en el anterior ***Paso 6.5*** es menor de ***1 mSv***, no hay necesidad de realizar una investigación más a fondo (***Paso 6.6.1***). (En estos casos el resultado relevante es la dosis asociaad a la incorporación que está siendo considerada, en vez de la dosis anual como en el ***Paso 3.4***, porque las situaciones que requieran aplicar estos procedimientos especiales de evaluación deberían ser muy inusuales para cualquier trabajador). De lo contrario habrá que aplicar métodos de evaluación más especiales (***Etapa 6B***) para una evaluación más detallada del caso.

Paso 6.6.1. ***Registrar los resultados obtenidos de la actividad incorporada y de la dosis efectiva comprometida*** del ***Paso 6.6***, junto con los correspondientes valores del ***Paso 6.3***.

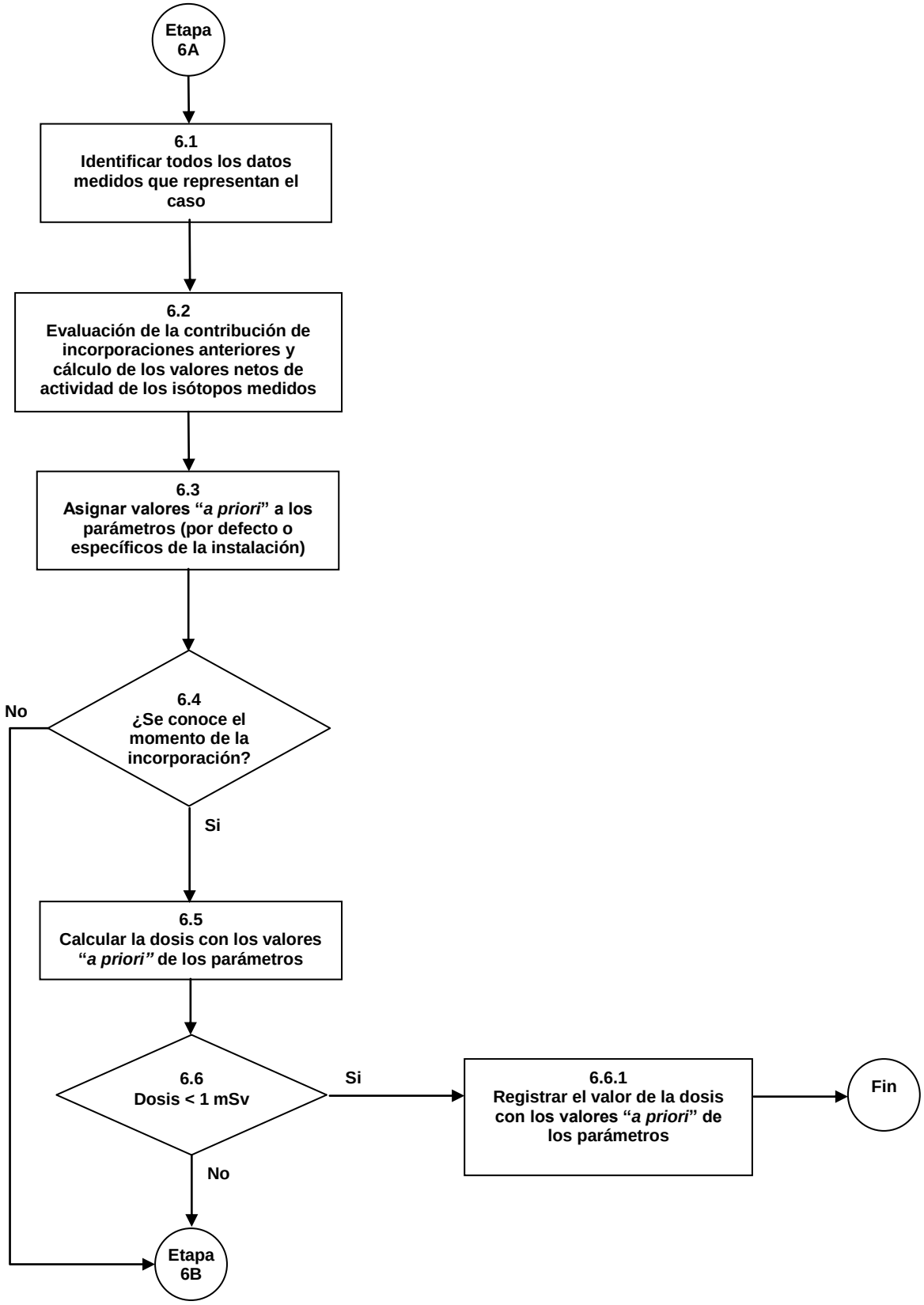


Figura 9.2 Etapa 6A. Procedimiento especial para casos de ingestión superior al Nivel 1 – Parte 1: Evaluación simple usando valores de parámetros elegidos *a priori*

9.3 Parámetros asociados a la exposición (Etapa 6B)

Los procedimientos de esta etapa describen la modificación de los dos factores principales relacionados con la ingestión, el valor de f_A/f_1 y el momento de la incorporación si no se conoce, utilizando datos de las medidas (***"a posteriori"***).

En esta etapa y en la que sigue, ***6C***, los valores de los diferentes parámetros se seleccionan en base al ajuste entre las predicciones del modelo y los datos (***medidas***) observados. Se realiza una comprobación para verificar si el ajuste es correcto y decidir entonces finalizar la evaluación o continuar con ella con pasos adicionales. La medida de la "***bondad del ajuste***" y el criterio para decidir si el ajuste es suficientemente bueno, son por tanto cuestiones críticas. Podría existir un conflicto entre "***armonización***" y "***exactitud***". Generalmente, cuanto mejor son los datos (en ***calidad*** y ***cantidad***), mayor es la probabilidad de que la prueba estadística muestre que los datos no son coherentes con el modelo. Si los datos son escasos es más probable que el modelo se ajuste con ellos - en el caso extremo de una sola medida, cualquier modelo ajustaría. Por lo tanto, es importante que se disponga de suficientes datos de medida disponibles cuando haya que evaluar una dosis significativa, y cuanto mayor sea la dosis, mejores deberán ser los datos. Por ello se hacen propuestas para decidir sobre el mínimo número de datos que serían aceptables ("***suficiente***", ver ***Apartado 6.5***)

Como se ve en los diagramas de flujo, existen dos alternativas en esta etapa del proceso, según se conozca o no del momento de la incorporación.

Paso 6.7. ***¿Hay suficientes datos?*** Como ya se ha indicado en la introducción***,*** el criterio para decidir si el número (y tipos) de datos disponibles es suficiente así como la duración del periodo de vigilancia, depende de la dosis. En este paso, el número de datos disponibles debe ser suficiente si la evaluación de dosis está comprendida en el rango ***1 mSv < Dosis < 6*** mSv, porque este procedimiento especial de evaluación se debe haber iniciado al suponer que la dosis iba a ser superior a ***1 mSv***. Dosis superiores a ***6 mSv*** se consideran en el ***Paso 6.13*** y siguientes.

Paso 6.7.1. ***Adquirir nuevas medidas***. Se está suponiendo que la evaluación se está llevando a cabo en tiempo real, de manera que existe la oportunidad de obtener nuevas medidas adicionales si las disponibles son insuficientes. (Para casos históricos, en donde no es posible conseguir más medidas, se registrará que los datos son insuficientes, y, por tanto, el resultado deberá ser tratado con cautela.) Una vez obtenidos nuevos datos, se realizará de nuevo una evaluación sencilla según la ***Etapa 6A***.

Paso 6.8. ***¿Se conoce el momento de la incorporación?*** En esta etapa del proceso se presentan dos rutas alternativas en función de que se conozca o no el momento de la incorporación. En general estos procedimientos especiales se aplican tras la aparición de algún incidente para el que se suele conocer el momento de la incorporación (***Paso 6.9***). Sin embargo se puede dar el caso de descubrirse incorporaciones anteriores no identificadas previamente, a través por ejemplo de una vigilancia rutinaria, para las que no se conoce o se conoce solo dentro de un cierto margen, el momento de la incorporación. Si no se conoce o se conoce solo dentro de un cierto margen el momento de la incorporación, se seguirá el ***Paso 6.10***, pero entonces hay pocas posibilidades de caracterizar ***"a posteriori"*** el material. Si los resultados de las medidas

de bioensayo que se tomen o se tomaron a continuación no decrecen con el tiempo, será difícil, en la práctica, estimar el momento de la incorporación. En estos casos se recomienda suponer que el momento de la incorporación ocurrió en el punto medio del intervalo de vigilancia.

Paso 6.9. ***Evaluación de la dosis utilizando los valores por defecto de f_A/f_1***. En el ***paso 6.3*** se ha hecho una determinación *"**a priori**"* del valor de f_A/f_1 de acuerdo con los documentos ***OIR*** de ***ICRP*** o de la publicación ***68*** de ***ICRP*** y en base a lo que se conozca de la forma química del material ingerido. Utilizando este valor por defecto de f_A/f_1, se comprueba la bondad del ajuste (***Paso 6.11***). Si el ajuste es aceptable se calcula entonces la dosis con los mismos valores de parámetros que los utilizados en la evaluación de la incorporación, y el proceso se traslada al ***Paso 6.12*** etc. Si el ajuste no es correcto, entonces se debe probar con otros tipos de valores para f_A/f_1 como sigue.

Para algunos elementos, la publicación ***68*** de ***ICRP*** y los documentos ***OIR*** de ***ICRP*** dan distintos valores de f_A/f_1 para diferentes formas químicas de los elementos. Se realizarán evaluaciones con todos los valores f_A/f_1 disponibles y en cada caso se evaluará la bondad del ajuste (***Paso 6.11***). Si el ajuste es aceptable se calcula entonces la dosis con los mismos valores de parámetros que los utilizados en la evaluación de la incorporación, y el proceso se traslada al ***Paso 6.12***. (Si se obtienen ajustes aceptables con más de un valor de f_A/f_1, se escogerá aquel que proporcione el mejor ajuste, es decir aquel en el que el ***p-valor*** sea mayor y siempre que también el ajuste sea bueno a ojos del evaluador)

Paso 6.10. ***Estimación de la dosis ajustando simultáneamente el momento de la incorporación y el valor de f_A/f_1***. A este paso se llega desde el ***Paso 6.8*** cuando no se conoce el momento de la incorporación.

En el ***Paso 6.3*** se ha hecho una determinación *"**a priori**"* del valor de f_A/f_1 de acuerdo con los documentos ***OIR*** de ***ICRP*** o de la publicación ***68*** de ***ICRP*** y en base a lo que se pueda conocer de la forma química del material ingerido. Utilizando este valor por defecto de f_A/f_1 y el momento de la incorporación por defecto (como en el ***Paso 3.2***: punto medio del periodo de vigilancia, es decir el punto medio entre la medida actual y la anterior medida o entre la medida actual y el inicio del periodo de vigilancia), se comprueba la bondad del ajuste (***Paso 6.11***). Si el ajuste es aceptable se calcula entonces la dosis con los mismos valores de parámetros que los utilizados en la evaluación de la incorporación, y el proceso se traslada al ***Paso 6.12***. Si el ajuste no es correcto, entonces se debe probar con otros tipos de valores para f_A/f_1 y otros momentos de la incorporación como sigue.

Para algunos elementos (***Co, Sr, U, Pu***) se espera que los documentos ***OIR*** de ***ICRP*** indiquen valores específicos de f_A en cada caso, mientras tanto, la publicación ***68*** de ***ICRP*** da distintos valores de f_1 para diferentes formas químicas de los elementos. Se realizarán evaluaciones con cada uno de los valores por defecto disponibles para ese elemento y para diferentes momentos de la incorporación abarcando todo el periodo o intervalo posible del momento de la incorporación. En cada caso se evaluará la bondad del ajuste (***Paso 6.11***).

Si se encuentra un ajuste aceptable también es probable que también se encuentren otros para diversos momentos de la incorporación y por tanto se escogerá aquella combinación entre los valores de f_A/f_1 y momentos de la incorporación que proporcione el mejor ajuste (aquel en el que el ***p-valor*** sea mayor y

siempre que también el ajuste sea bueno a ojos del evaluador). La dosis se calculará entonces con los mismos valores de parámetros que los utilizados en la evaluación de la incorporación, y el proceso se traslada al ***Paso 6.12***.

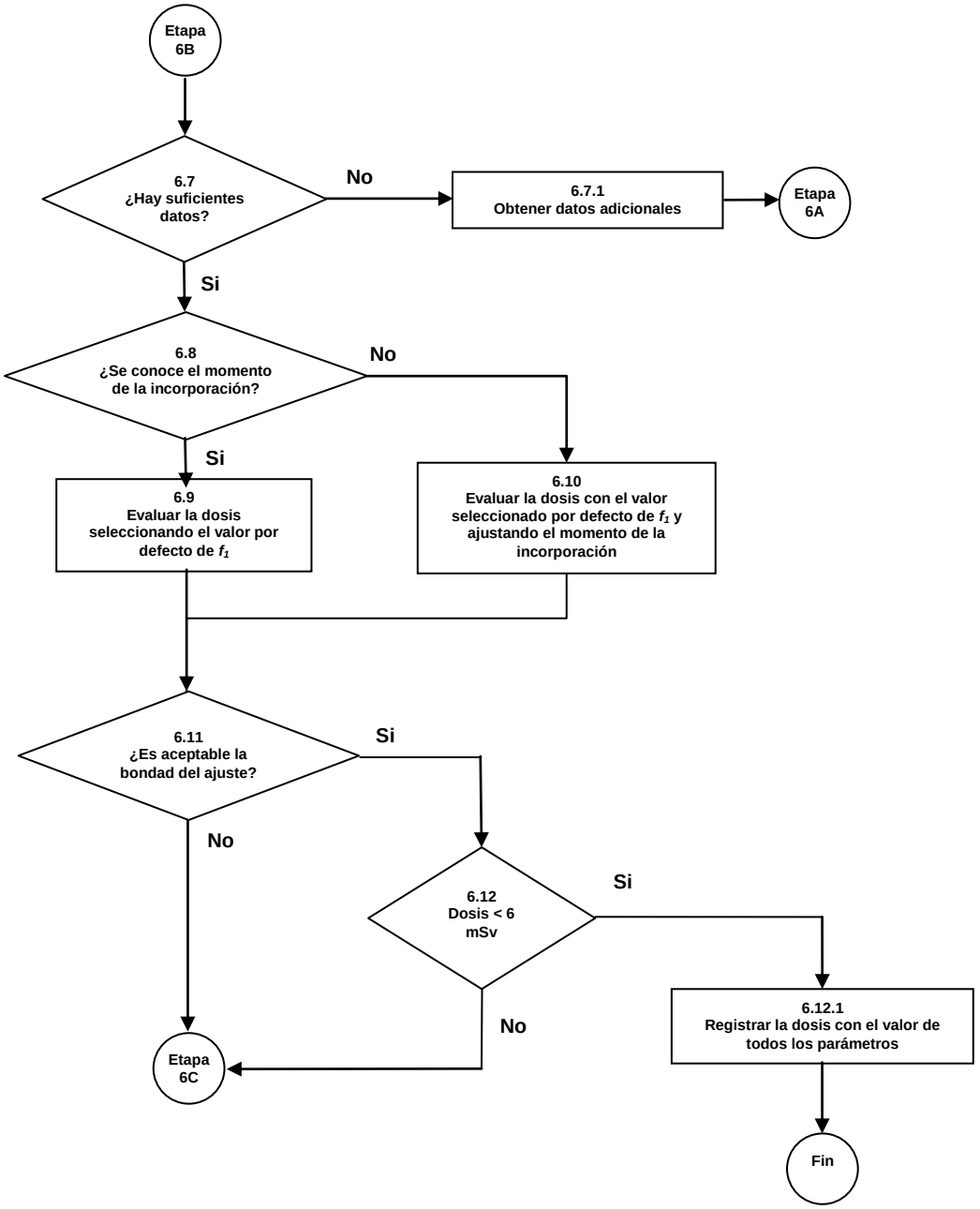


Figura 9.3 Etapa 6B. Procedimiento especial para casos de ingestión superior al Nivel 1 – Parte 2: Variación del valor de f1 y si se desconoce, también del momento de la incorporación

Paso 6.11. ***¿Es aceptable la bondad del ajuste?*** Si la bondad de ajuste es aceptable (es decir el ajuste no se rechaza por los criterios del ***Apartado 6.3***), entonces se acepta la estimación de la incorporación como su mejor estimación. De lo contrario, hacen falta procedimientos especiales adicionales para realizar una evaluación más detallada del caso (***Paso 6.13***, en adelante).

Paso 6.12. ***¿Es la dosis inferior a 6 mSv?*** Si la dosis efectiva estimada en los ***Pasos 6.9*** o ***6.10*** es inferior a ***6 mSv***, no hay necesidad de realizar una investigación más a fondo (***Paso 6.12.1***). Pero si la dosis es superior a ***6 mSv***, entonces se necesitan procedimientos especiales adicionales para una evaluación más detallada del caso (***Paso 6.13 en adelante***).

Paso 6.12.1. ***Registrar los resultados de la actividad incorporada y de la dosis efectiva comprometida*** obtenidos en el ***Paso 6.12*** junto con los correspondientes valores de los parámetros de los ***Pasos 6.9*** o ***6.10***.

9.4 Evaluación avanzada (Etapa 6C)

En esta etapa se lleva a cabo una evaluación avanzada. Se aplica en aquellos casos en los que se dispone de un conjunto completo de datos. El aspecto fundamental en esta etapa es que se ajustan de forma sistemática y en un orden específico los valores de los parámetros de los modelos hasta obtener un ajuste aceptable (el ajuste obtenido con todos los datos no se rechaza con los criterios del ***Apartado 6.3***). Si el ajuste es aceptable se acepta la estimación de la incorporación como su mejor estimación y la dosis se calcula con los mismos valores de parámetros que los utilizados en la estimación de la incorporación. Se registran los resultados de la incorporación y de la dosis efectiva comprometida junto con los correspondientes valores de los parámetros (***Paso 6.12.1***). Por tanto, después de cada paso en el que se modifique el valor de algún parámetro (***Pasos 6.14*** a ***6.16***), hay un paso correspondiente para comprobar la bondad del ajuste (***Pasos 6.14.1*** al ***6.16.1*** respectivamente), y puesto que ambos pasos son muy similares solo se explica el ***Paso 6.14.1***.

Aunque no se conozca el momento de la incorporación, ya debería haber sido evaluado al inicio de esta etapa ajustando el modelo a los datos de las medidas con el valor de f_A/f_1 (***Paso 6.10***). Ahora bien, si en los pasos posteriores se modifica cualquiera valor de los parámetros del modelo, habrá que reevaluar el momento de la incorporación.

Se recomienda que si se dispone de varios tipos de medidas de bioensayo, se calculen tanto la actividad incorporada como la dosis, ajustando simultáneamente los diferentes tipos de medidas con las predicciones de sus respectivos modelos.

Paso 6.13. ***Verificar si hay suficientes datos y obtener más si fuera necesario***. Esto es similar a los ***Pasos 6.7*** y ***6.7.1*** de la ***Etapa 6B***. El criterio para decidir si el número (y tipos) de datos disponibles es suficiente así como la duración del periodo de vigilancia depende de la dosis. En este paso el número de datos para ***D > 6 mSv*** es apropiado.

Se está suponiendo que la evaluación se está llevando a cabo en tiempo real, de manera que existe la oportunidad de obtener nuevas medidas adicionales si las disponibles son insuficientes. (Para casos históricos, en donde no es posible conseguir más medidas, se registrará que los datos son insuficientes, y, por tanto, el resultado final deberá ser tratado con cautela.) Una vez obtenidos nuevos datos, se necesitan procedimientos especiales adicionales (***Paso 6.14*** y siguientes) para una evaluación más detallada del caso.

Paso 6.14. ***Determinar un valor específico para f_1.*** f_1 es el principal parámetro de la ingestión. Los valores por defecto recomendados por ***ICRP*** son generalmente valores típicos que representan el amplio rango de

valores que se pueden encontrar en la práctica, especialmente cuando solo se dispone de un único valor de f_1 para todas las formas químicas del elemento. La absorción gástrica también puede variar de acuerdo con factores tales como el tiempo que ha pasado desde la última comida. Por tanto es razonable considerar valores diferentes del recomendado por defecto por ***ICRP***. Si se dispone de suficientes medidas, especialmente si ha sido posible estimar a la vez la incorporación y la actividad total absorbida en sangre (es decir, si se ha dispuesto de valores de actividad en orina y heces durante los primeros días tras la incorporación), entonces podrá ser necesario modificar el valor de f_1 para poder obtener un ajuste razonable de los datos de las medidas.

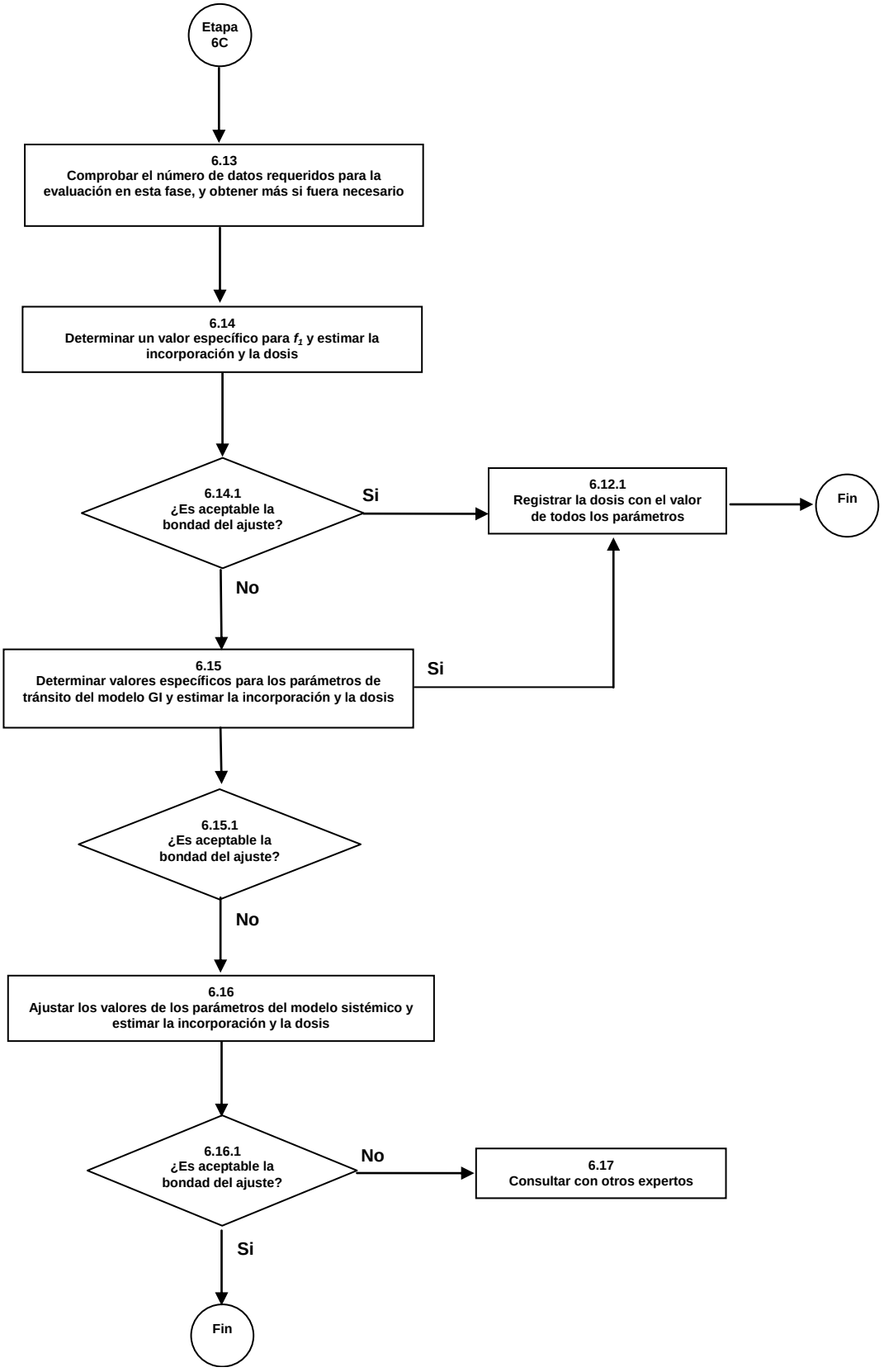


Figura 9.4 Etapa 6C. Evaluación más sofisticada para casos de ingestión cuando se dispone de un conjunto amplio de medidas. Ajuste sistemático de los valores de los parámetros de los modelos biocinéticos hasta obtener un ajuste aceptable

Paso 6.14.1. ***¿Es aceptable la bondad del ajuste?*** Si la bondad del ajuste es aceptable (es decir el ajuste no se rechaza por los criterios del ***Apartado 6.3***), se acepta la estimación de la incorporación como su mejor estimación. Se calcula la dosis efectiva con los mismos valores de los parámetros del modelo empleados en la estimación de la incorporación. Si el ajuste no es aceptable se va al ***Paso 6.15***.

Paso 6.15. ***Determinar valores específicos para los parámetros de tránsito del modelo del Tracto Alimentario***. Los valores de los parámetros del modelo del tracto alimentario de ***ICRP*** representan valores típicos por lo que se pueden dar grandes diferencias inter e intra-individuos. Más aún y como se ha indicado en el ***Apartado 4.1***, para facilitar el cálculo, el tránsito gástrico está representado por una serie de compartimentos que decaen exponencialmente, aunque en la práctica, el movimiento gástrico se parece más al de una babosa. Es por tanto muy improbable que la actividad diaria medida en heces de una persona durante los primeros días tras una incorporación siga las predicciones de los modelos. El tiempo de tránsito por el tracto alimentario afecta a la actividad en todo el cuerpo y a la excretada en heces durante los primeros días tras una incorporación por inhalación o ingestión. Si se dispone de suficientes datos en estos primeros días tras la incorporación, puede ser necesario modificar los tiempos de tránsito del modelo alimentario para obtener un mejor ajuste de los datos.

Paso 6.16. ***Ajustar los valores de los parámetros del modelo sistémico***. Los valores de los parámetros de los modelos sistémicos que recomienda ***ICRP*** fueron escogidos para representar valores medios de la población por lo que se pueden dar variaciones entre individuos que den lugar a diferencias entre los valores que predicen los modelos y las medidas, con independencia de los parámetros biocinéticos del modelo alimentario. Esto puede ocurrir con materiales muy solubles o con los actínidos en los que se pueden observar diferencias entre individuos y las predicciones del modelo para la retención en hígado o huesos o entre la relación entre la actividad depositada en estos órganos y la actividad excretada en orina.

Hay que reseñar que este es el último paso, de modo que el ajuste de los parámetros biocinéticos sólo debe ser considerado tras haber modificado los valores de los parámetros del modelo alimentario y de f_A/f_1 (***Pasos 6.14*** y ***6.15***). Si la prueba de la bondad del ajuste resulta en que el ajuste no es aceptable conforme al criterio específico, entonces consúltese con otros expertos. Si el ajuste final es aceptable, se registrarán los valores de la incorporación y dosis efectiva comprometida junto con los valores de los parámetros biocinéticos de los modelos utilizados en la evaluación de la incorporación y de la dosis (***Paso 6.12.1***).

10. Mezcla de inhalación e ingestión (Etapa 7)

10.1 Aspectos generales

Este procedimiento especial es análogo a los descritos para la inhalación e ingestión (***Apartados 8.1 y 9.1***) y por ello aquí se da un cierto grado de repetición con lo indicado para inhalación e ingestión. Se agrupa también en tres etapas (ver el diagrama de flujo de la ***Figura 10.1***).

En la primera (***Etapa 7A***) se realiza una evaluación sencilla utilizando los valores escogidos *"**a priori**"*, es decir, antes de haber llevado a cabo la evaluación. El procedimiento es muy similar al procedimiento ***estándar*** de la ***Etapa 3***. La única diferencia es que en un procedimiento especial debería haber más de una medida.

En la segunda ***Etapa 7B*** se modifica el parámetro más relevante del escenario, la distribución de la incorporación entre inhalación e ingestión y el momento de la incorporación si se desconociera, utilizando los datos de las medidas (*"**a posteriori**"*).

En la tercera ***Etapa 7C*** se lleva a cabo una evaluación más elaborada o avanzada y se aplica en aquellos casos en los que se dispone de suficientes medidas. El aspecto fundamental en esta etapa es que se ajustan de forma sistemática y en un orden específico los valores de los parámetros de los modelos hasta que se obtenga ajuste aceptable (es decir el ajuste no es rechazado por los criterios del ***Apartado 6.3***).

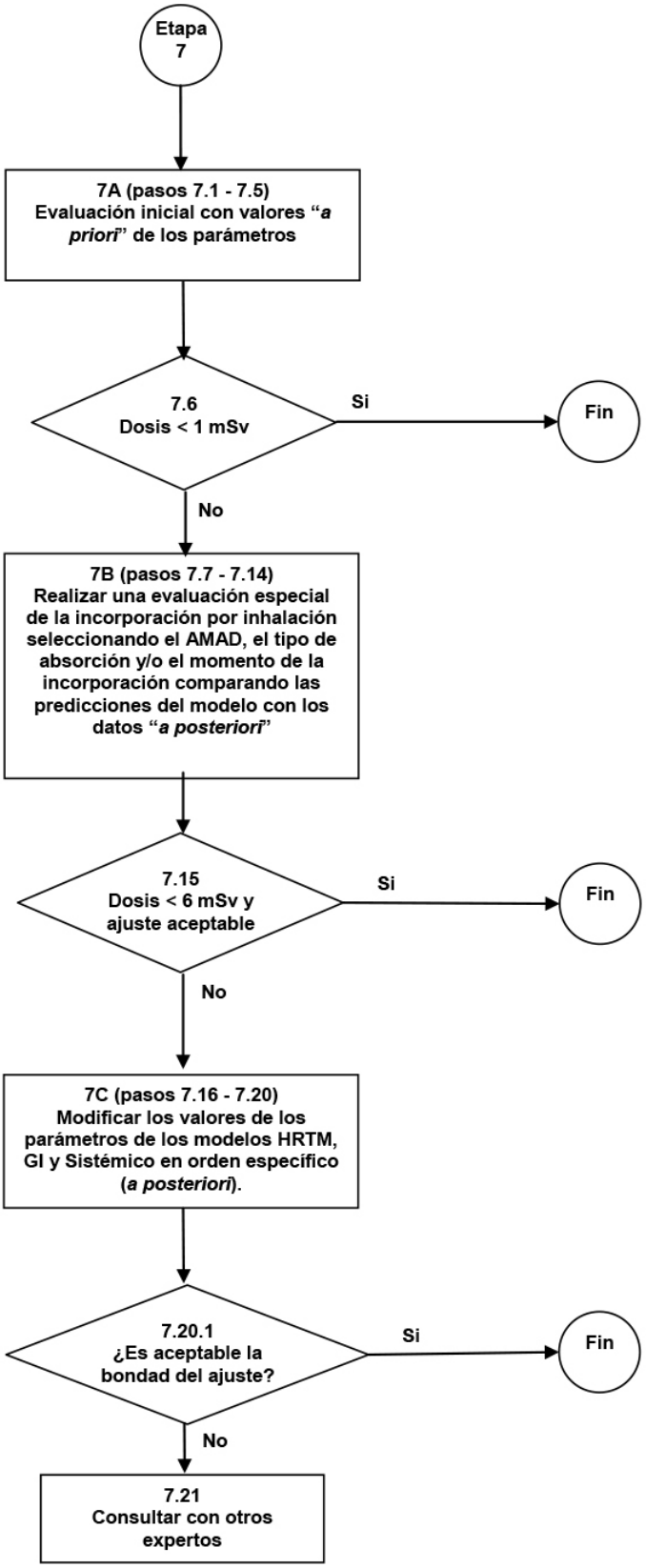


Figura 10.1 Etapa 7. Procedimiento especial para casos mixtos de inhalación e ingestión por encima del Nivel 1. Aspectos generales

10.2 Evaluación sencilla (Etapa 7A)

En esta etapa se realiza una evaluación sencilla utilizando valores ***"a priori"*** de los parámetros, es decir antes de haberse realizado la evaluación. El proceso es similar al procedimiento ***normal*** (***estándar***) de la ***Etapa 3***. La diferencia principal es que en un procedimiento especial debería haber más de una medida.

Paso 7.1. ***Identificación y preparación de los datos de las medidas***. Se parte de la base de que hay más de una medida disponible para esta evaluación especial (M_i para $i = 1$ hasta n). Por tanto es importante que las incertidumbres asignadas a los datos sean realistas ("***Factor de dispersión***" ***SF*** según tabla del ***Paso 2.1***). Puede haber más de un tipo de medida (***orina***, ***heces***, etc.), y podría haber también más de un radionucleido involucrado en la exposición, situación muy usual.

Explorar la posibilidad de que algunas medidas estén fuera de rango por medio del procedimiento del ***Apartado 6.1***.

Paso 7.2. (***Como el Paso 2.3, para una sola medida***). Se calculan las contribuciones (P_i) de todas las incorporaciones anteriores en las que se detectó el(los) radionucleido(s) en cuestión, teniendo en cuenta todas las posibles vías de incorporación y todas las mezclas de radionucleidos en los se encontró el radionucleido objeto del análisis. Calcular los valores netos ($N_i = M_i - P_i$) de las medidas del radionucleido restando P_i del valor medido M_i.

Paso 7.3. (***Como el paso 3.2 en el procedimiento normal (estándar) de la Etapa 3, a excepción del momento de la incorporación***). Si se dispusiera de ellos se utilizarán valores específicos del caso o de la instalación para los parámetros de la evaluación. Tal información ***"a priori"*** deberá estar bien establecida y documentada. Ejemplos de lo anterior pueden ser el ***AMAD*** si se hubiera determinado por algún procedimiento apropiado de muestreo (p.e. impactador en cascada) o el momento de la incorporación si la exposición potencial está delimitada en el tiempo o se conoce la existencia de algún incidente. En caso contrario se utilizarán los siguientes valores por defecto:

- **Tipo de incorporación**: ***Única***. Por defecto se supone ***100% inhalación***.
- **Tipo de absorción y valor de f_A/f_1 para inhalación**: ***Valores por defecto de los documentos OIR de ICRP o de la publicación 68 de ICRP***. Si se desconoce el compuesto del elemento, para aquellos elementos en que se pueda elegir, se optará por el tipo de absorción correspondiente a "***compuesto sin especificar***".
- **Valor de f_A/f_1 para ingestión**: ***Valores por defecto de los documentos OIR de ICRP o de la publicación 68 de ICRP***.
- **Tamaño de partícula**: ***AMAD de 5 μm***.

Paso 7.4. ***Momento de la incorporación conocido/desconocido***. Si esta evaluación especial se inició a raíz de un incidente o suceso del que se tiene información (y por tanto el momento de la incorporación es conocido), entonces se llevará a cabo una evaluación sencilla (***Paso 7.5***) consistente con la evaluación ***estándar*** (***Etapa 3***). Si esta evaluación especial se ha iniciado a raíz de una medida rutinaria inconsistente con medidas anteriores (***Paso 2.6***) o por una ***dosis superior a 1 mSv*** resultante de una evaluación ***estándar***

(***Paso 3.4***) en la que lo más probable es que no se conozca momento de la incorporación, habrá entonces que aplicar los procedimientos especiales de la ***Etapa 7B*** para conseguir una evaluación más detallada del caso.

Paso 7.5. (***Como en el paso 3.3 del procedimiento estándar, Etapa 3, pero para más de una medida***). Usando los valores asignados *"**a priori**"* de los parámetros, se obtiene una estimación de la incorporación I_i dividiendo el valor neto de la medida $N_i = M_i - P_i$ por la función apropiada de retención o de excreción $m_i(t)$. La media geométrica de los distintos valores I_i obtenidos dará la mejor estimación de la incorporación (ver ***Paso 5.5***). Utilizando los mismos valores asignados *"**a priori**"* de los parámetros utilizados, se calcula la dosis efectiva comprometida multiplicando la mejor estimación de la incorporación por el coeficiente de dosis (dosis por unidad de incorporación).

Paso 7.6. ***Si la dosis efectiva estimada en el Paso anterior 7.5 es menor*** de ***1 mSv***, no hay necesidad de realizar una investigación más a fondo (***Paso 7.6.1***). (En estos casos el resultado relevante es la ***dosis*** debida a la incorporación en consideración, en vez de la dosis anual como en el ***Paso 3.4***, porque las situaciones que requieran aplicar estos procedimientos especiales de evaluación deberían ser muy poco frecuentes para cualquier trabajador). De lo contrario habrá que aplicar métodos de evaluación más especiales (***Etapa 7B***) para una valoración más detallada del caso.

Paso 7.6.1. ***Registrar los resultados*** obtenidos de la actividad incorporada y de la dosis efectiva comprometida del ***Paso 7.6***, junto con los correspondientes valores de los parámetros utilizados en la evaluación dosimétrica del ***Paso 7.3***.

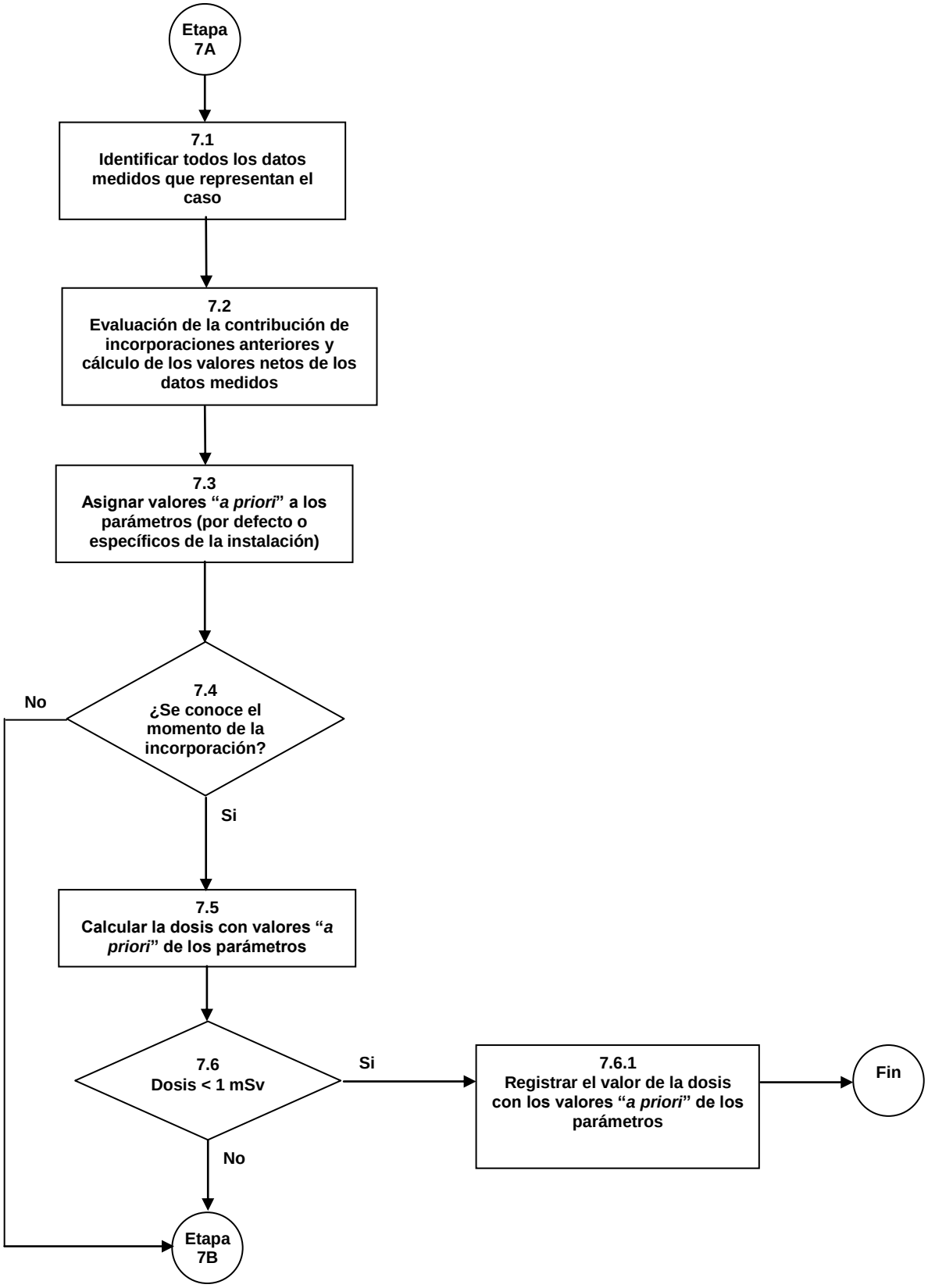


Figura 10.2 Etapa 7A. Procedimiento especial para casos mixtos de inhalación e ingestión por encima del Nivel 1 Parte 1: Evaluación sencilla usando valores de parámetros escogidos *a priori*

10.3 Parámetros asociados a la exposición (Etapa 7B)

En esta etapa, utilizando los datos de las medidas ***"a posteriori"***, se describen los procedimientos que modifican:

- ***La vía de incorporación (inhalación frente a ingestión)***
- ***El tipo de absorción del material inhalado***
- ***El momento de la incorporación si es desconocido***.

El procedimiento es muy semejante al procedimiento especial de la ***Etapa 5B*** para casos mixtos de inhalación, excepto que ahora la vía de incorporación es una variable adicional y no puede ser modificada ***"a posteriori"*** como tampoco puede serlo el ***AMAD***. (Compárese el ***Paso 7.10*** con el ***5.10***)

En esta ***Etapa 7B*** y en la que sigue ***7C***, los valores de los diferentes parámetros se seleccionan en base al ajuste entre las predicciones del modelo y los datos observados. Se realiza una comprobación para verificar si el ajuste es correcto y decidir entonces si finalizar la evaluación o continuar con pasos adicionales. La medida de la "***bondad del ajuste***" y el criterio para decidir si el ajuste es suficientemente bueno, son por tanto cuestiones críticas. Podría existir un conflicto entre "***armonización***" y "***exactitud***". Generalmente, cuanto mejores sean los datos (en ***calidad*** y ***cantidad***), mayor es la probabilidad de que la prueba estadística muestre que los datos no son consistentes con el modelo. Si los datos son escasos es más probable que el modelo se ajuste con ellos - en el caso extremo de una sola medida, cualquier modelo ajustaría. Por lo tanto, es importante que se disponga de suficiente información cuando haya que evaluar una dosis significativa, y cuanto mayor sea la dosis, mejores deberían ser los datos. Por ello se hacen propuestas para decidir sobre el mínimo número de datos que serían aceptables ("***suficiente***", ver ***Apartado 6.5***)

Como se ve en el diagrama de flujo, existen dos rutas alternativas en esta ***Etapa*** del proceso, según se conozca o no del momento de la incorporación.

Paso 7.7. ***¿Hay suficientes datos?*** Como ya se ha indicado anteriormente en el ***Apartado 6.5,*** el criterio para decidir si el número (y tipos) de datos disponibles es suficiente así como la duración del periodo de vigilancia depende de la dosis. En este paso, el número apropiado de datos es el correspondiente al rango ***1 mSv < D < 6 mSv***, porque este procedimiento especial de evaluación se ha iniciado al suponer que la dosis iba a ser superior a ***1 mSv***. Dosis superiores a ***6 mSv*** se consideran en los ***Pasos 7.11.2*** y ***7.12.2***.

Paso 7.7.1. ***Adquirir nuevos datos de medidas***. Se está suponiendo que la evaluación se está llevando a cabo en tiempo real, de manera que existe la oportunidad de obtener nuevas medidas adicionales si las disponibles son insuficientes. (Para casos históricos, en donde no es posible conseguir más medidas, se registrará que los datos son insuficientes, y, por tanto, el resultado final de la incorporación y de la dosis deberán ser tratados con cautela.) Una vez obtenidos nuevos datos, se realizará de nuevo una re-evaluación simple según la ***Etapa 7A***.

Paso 7.8. ***¿Se conoce el momento de la incorporación?*** En esta etapa del proceso se presentan dos rutas alternativas en función de que se conozca o no el momento de la incorporación. En general estos

procedimientos especiales se aplican tras algún incidente del que se conoce el momento de la incorporación (***Pasos 7.9*** a ***7.11*** y si es necesario también el ***7.13***). Sin embargo se puede dar el caso de descubrirse incorporaciones anteriores no identificadas previamente, a través por ejemplo de una vigilancia rutinaria, para las que no se conoce o se conoce solo dentro de un cierto margen el momento de la incorporación. Si no se conoce el momento de la incorporación o se conoce solo dentro de un cierto margen se seguirá el ***Paso 7.12*** y si es necesario también el ***Paso 7.14*** pero entonces hay pocas posibilidades de caracterizar *"**a posteriori**"* el material. Si los resultados de las medidas de bioensayo que se tomen o se tomaron a continuación no decrecen con el tiempo, será difícil, en la práctica, estimar el momento de la incorporación. En estos casos se recomienda suponer que el momento de la incorporación ocurrió en el punto medio del intervalo de vigilancia.

Paso 7.9. ***¿Se dispone de datos iniciales de actividad en pulmones y heces?*** Durante los primeros días tras una inhalación de un material relativamente insoluble (***Tipo M*** o ***Tipo S***), la mayor parte de la actividad se encuentra en las vías respiratorias o está siendo eliminada por el tracto ***GI*** a través de las heces. En situaciones de este tipo con una posible incorporación importante, sería deseable disponer de medidas en pulmones y en heces. Si el ***AMAD*** está bien determinado *"**a priori**"* y se dispone a la vez de medidas de la actividad acumulada en heces durante los primeros días y de una medida que permita estimar la actividad pulmonar inicial, entonces se puede hacer una estimación de la vía efectiva de incorporación, es decir se puede distinguir entre las fracciones inhalada e ingerida de la incorporación (***Paso 7.10***).

Paso 7.10. ***Determinar la vía efectiva de la incorporación a partir de medidas tempranas de actividad en pulmones y heces***.

Se parte de la base de que se conoce el ***AMAD*** por ejemplo a través de medidas del ambiente de trabajo que permiten conocer la distribución de actividad por tamaños y se considera que la inhalación ha estado acompañada por una ingestión (por medidas de contaminación externa, excreción fecal importante).

Si se dispone de medidas iniciales de la retención pulmonar y de la excreción fecal, es posible determinar la fracción "***efectiva***" de la actividad inhalada de la misma forma que se determinó el ***valor efectivo del AMAD*** en la ***Etapa 5B***.

Si la fracción inhalada es F_{INH}, entonces la fracción ingerida será $1 - F_{INH}$. Al cabo de ***3 días*** tras la inhalación, las fracciones de la actividad inhalada retenida en pulmones y excretada serán F_P y $F_{INHheces}$. Al cabo de tres días tras la ingestión, la fracción de actividad excretada en heces será $F_{INGheces}$. De este modo el cociente entre la actividad retenida pulmones ***P*** y la actividad acumulada en heces ***H*** al cabo de tres días será:

$$R(P/H) = (F_{INH}\, F_P) / [F_{INH}\, F_{INHheces} + (1 - F_{INH})\, F_{INGheces}]$$

Por ejemplo, para el ***Am-241***, $F_{INGheces}$ = ***87% a los 3 días***. F_P y $F_{INHheces}$ serán para ***AMAD*** de ***1*** y ***5 µm***, para los tipos ***M*** y ***S***, los siguientes:

Tabla 10.1 Fracción de la actividad inhalada en pulmones al cabo de 3 días y actividad acumulada en heces desde el día 1 al día 3 para el Am-241 (Los valores de $F_{INHheces}$ y F_P se pueden obtener de las tablas publicadas por C. Potter [*Potter 2002*] o se pueden calcular con el software IMBA [*Birchall 2003*])

AMAD, µm	*Tipo*	F_P *(%)*	$F_{INHheces}$ *(%)*
1	M	10,5	18,6
1	S	11,8	19,6
5	M	5,5	34,4
5	S	6,2	36,1

Utilizando estos valores anteriores, la dependencia de la relación entre la actividad en pulmones y la actividad excretada en heces para el ***Am-241*** y para diferentes fracciones de la actividad inhalada, se muestra en la figura 10.3:

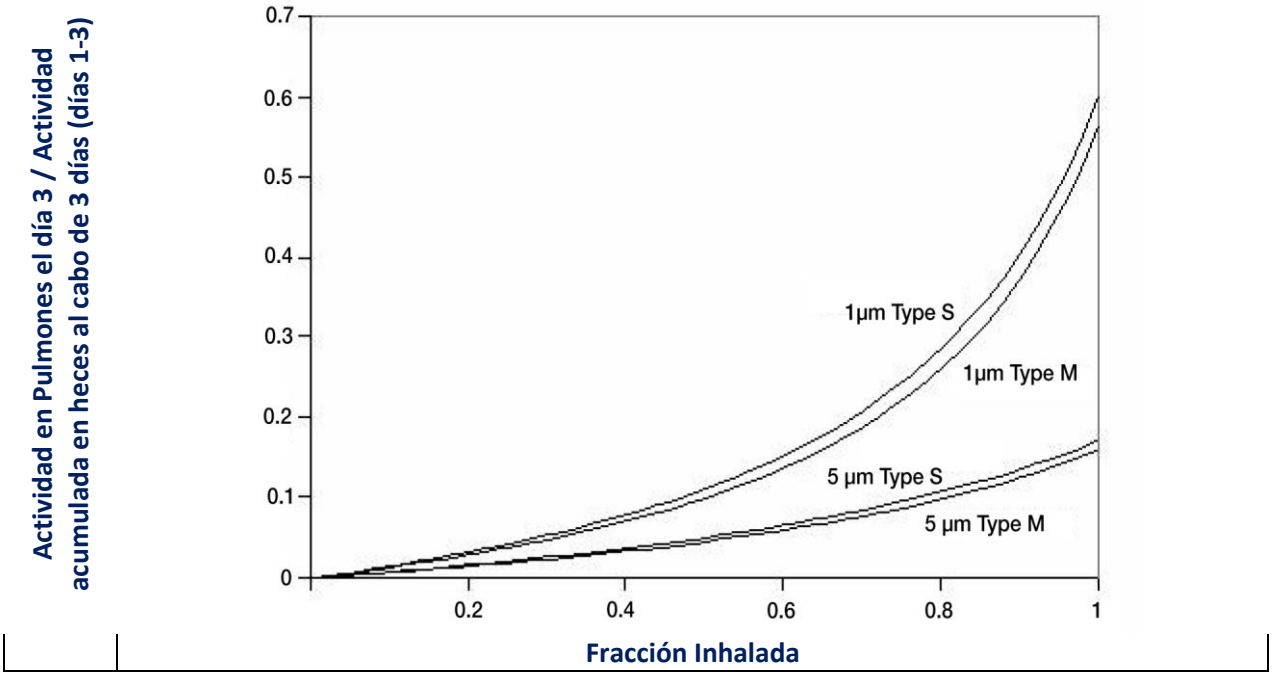


Figura 10.3 Variación con la fracción inhalada, de la relación entre la actividad en pulmones al cabo de 3 días tras la inhalación y la actividad acumulada en heces desde el día 1 al 3 para el Am-241 según el modelo HRTM para el Trabajador de Referencia

Paso 7.11. ***Evaluar la dosis ajustando el tipo de absorción***. En este paso el ***AMAD*** ya tiene que haber sido determinado *"**a priori**"* así como la fracción inhalada de la actividad total que ha sido elegida por defecto (***Paso 7.3***) o determinada *"**a posteriori**"* (***Paso 7.10***). La otra característica fundamental de la inhalación es el tipo de absorción. En el ***Paso 7.3*** se ha hecho una asignación *"**a priori**"* del tipo de absorción según las recomendaciones de los documentos ***OIR*** de ***ICRP*** o de la publicación ***68*** de ***ICRP*** y en base a lo que se pueda conocer de la forma química del material inhalado. Utilizando este valor por defecto del tipo de absorción, se comprueba la bondad del ajuste (***Paso 7.11.1***). Si el ajuste es aceptable se calcula entonces la dosis con los mismos valores de parámetros que los utilizados en la evaluación de la incorporación, y el proceso se traslada al ***Paso 7.11.2*** etc. Si el ajuste no es correcto, entonces hay que probar con otros valores del tipo de absorción.

Los tipos de absorción para material inhalado en forma de partículas, establecidos por defecto por ***ICRP***, ***F (Rápido)***, ***M (moderado)*** y ***S (lento)*** representan un amplio rango de tasas de absorción. Puede haber grandes diferencias entre el comportamiento real de absorción del material en particular y el supuesto por defecto asignado por el modelo, lo que puede afectar en gran medida a la retención pulmonar y a la actividad excretada en orina. Por tanto habrá que repetir la evaluación con cada uno de los tipos de absorción por defecto disponibles para el elemento en cuestión. En cada nueva evaluación se realizará una prueba de la bondad del ajuste ***Paso 7.11.1***. Si el ajuste es aceptable se calculará la dosis con este mismo tipo de absorción y resto de parámetros utilizados en la determinación de la incorporación y el proceso se dirige al ***Paso 7.11.2***. Si se obtienen buenos ajustes con más de un tipo de absorción, se elegirá el de mejor ajuste (aquel que proporcione el mayor ***p-valor*** siempre que el ajuste sea también aceptable a ojos del evaluador).

Paso 7.11.1. ***¿Es aceptable la bondad del ajuste?*** Si la bondad de ajuste es aceptable (es decir el ajuste no es rechazado por los criterios del ***Apartado 6.3***), entonces la incorporación estimada se acepta como su mejor estimación. De lo contrario, hacen falta procedimientos especiales adicionales para realizar una evaluación más detallada del caso (***Paso 7.13*** en adelante).

Paso 7.11.2 ***¿Es la dosis inferior a 6 mSv?*** Si la ***dosis efectiva*** estimada en el ***Paso 7.11*** es ***inferior*** a ***6 mSv***, no hay necesidad de realizar una investigación más a fondo (***Paso 7.11.3***). Pero si la ***dosis*** es ***superior*** a ***6 mSv***, entonces se necesitan procedimientos especiales adicionales para una evaluación más detallada del caso (***Paso 7.11.4*** en adelante).

Paso 7.11.3. ***Registrar los resultados*** de la actividad incorporada para cada vía de incorporación y de la dosis efectiva comprometida del ***Paso 7.11*** junto con los correspondientes valores de los parámetros del ***Paso 7.11***.

Paso 7.11.4. ***Verificar si hay suficientes datos y obtener más si fuera necesario***. Esto es similar a los ***Pasos 7.7*** y ***7.7.1***. El criterio para decidir si el número (y tipos) de datos disponibles es suficiente así como la duración del periodo de vigilancia depende de la dosis En esta etapa el número apropiado de datos es el correspondiente a una dosis ***D > 6 mSv***. ***(Apartado 6.5)***.

Para adquirir nuevos datos de medidas se está suponiendo que la evaluación se está llevando a cabo en tiempo real, de manera que existe la oportunidad de obtener nuevas medidas adicionales si las disponibles son insuficientes. Una vez obtenidos los nuevos datos, se necesitan procedimientos especiales adicionales (***Paso 7.13*** y siguientes) para una evaluación más detallada del caso. (Para casos históricos, en donde no es posible conseguir más medidas, se registrará que los datos son insuficientes y por tanto los resultados de actividad incorporada y dosis deberán ser tratados con cautela.)

Paso 7.12. ***Evaluar la dosis ajustando de forma simultánea el momento de la incorporación y la vía de incorporación (fracción inhalada)***. A este paso se llega desde el ***Paso 7.8***, cuando no se conoce el momento de la incorporación. En este paso, el ***AMAD*** se tiene que haber determinado de acuerdo con la información disponible: valor por defecto de ***5 µm*** o por caracterización ***"a priori"***. De manera similar se ha hecho en el

Paso 7.3 también una asignación ***"a priori"*** del tipo de absorción conforme a los documentos ***OIR*** de ***ICRP*** o de la publicación ***68*** de ***ICRP*** y en base a lo que se pueda conocer de la forma química del material inhalado.

Se verificará la bondad del ajuste (***paso 7.12.1***) utilizando el tipo de absorción por defecto, la vía de incorporación por defecto (***Paso 7.3***) y el momento de incorporación por defecto (al igual que en el ***Paso 3.2***: el punto medio del intervalo de vigilancia, es decir el punto medio entre la medida actual y la anterior medida o el punto medio entre la medida actual y en inicio del intervalo de vigilancia). Si el ajuste es aceptable, se calcula la dosis con los mismos valores de los parámetros del modelo que se utilizaron en la estimación de la incorporación, y se pasa al ***Paso 7.12.2***, etc. Si el ajuste no es aceptable hay que probar con otros valores de la fracción inhalada de la actividad total y distintos momentos de la incorporación como se indica a continuación.

Se realizarán otras evaluaciones para diferentes momentos de la incorporación abarcando todo el periodo posible de la incorporación y para diferentes valores de la fracción inhalada de la actividad total. En cada nueva evaluación se realiza una comprobación de la bondad del ajuste (***Paso 7.12.1***).

Si se encuentra un ajuste aceptable, es probable que también se encuentren otros para más momentos de la incorporación y diferentes fracciones de inhalación. Por tanto se elegirá la combinación de momento de la incorporación y fracción de inhalación que proporcione un mejor ajuste. La dosis se calculará utilizando los mismos valores de los parámetros que se emplearon en la estimación de la incorporación, y se irá al ***Paso 7.12.2*** etc.

Paso 7.12.1. ***¿Es aceptable la bondad del ajuste?*** Si la bondad de ajuste es aceptable (el ajuste no es rechazado por los criterios del ***Apartado 6.3***), entonces la estimación de la incorporación se acepta como su mejor estimación. De lo contrario, son necesarios nuevos procedimientos especiales para una evaluación más detallada del caso (***Paso 7.14***, en adelante).

Paso 7.12.2. ***¿Es la dosis inferior a 6 mSv?*** Si la dosis efectiva estimada en el ***Paso 7.12*** es inferior a ***6 mSv***, no hay necesidad de realizar una investigación más a fondo (***Paso 7.12.3***). De lo contrario, son necesarios otros procedimientos especiales para una evaluación más detallada del caso (***Paso 7.12.4***, en adelante). Lo mismo aplica si la dosis efectiva estimada en el ***Paso 7.12*** es mayor de ***6 mSv*** y si hay otras incorporaciones en el año que dan lugar a una dosis efectiva mayor de ***6 mSv***.

Paso 7.12.3. ***Registrar los resultados*** de la actividad incorporada y de la dosis efectiva comprometida del ***Paso 7.12*** junto con los correspondientes valores de los parámetros del ***Paso 7.12***.

Paso 7.12.4. ***Comprobar si hay datos suficientes y obtener más si fuera necesario***. Esto es similar a los ***Pasos 7.7*** y ***7.7.1***. El criterio para decidir si el número (y tipos) de datos disponibles son suficientes, así como la duración del periodo de vigilancia depende de la dosis (***Apartado 6.5***). En este paso se considera que el número de datos apropiado es el correspondiente a una dosis ***D > 6 mSv***.

Para adquirir nuevos datos de medidas se está suponiendo que la evaluación se está llevando a cabo en tiempo real de manera que existe la oportunidad de obtener nuevas medidas adicionales si las disponibles son insuficientes. (Para casos históricos, en donde no es posible conseguir más medidas, se registrará que los datos son insuficientes, y, por tanto, los resultados obtenidos para la incorporación y la dosis deberán

ser tratados con cautela.) Una vez obtenidos nuevos datos, se necesitan otros procedimientos especiales adicionales (***Paso 7.14*** y siguientes) para una evaluación más detallada del caso.

Paso 7.13. ***Evaluar la dosis ajustando con una mezcla de tipos de absorción (F, M, S) y la vía de incorporación (fracción inhalada)***. Esta es una extensión del ***Paso 7.11***, para dar una mayor flexibilidad al ajuste considerando una mezcla de tipos de absorción ***y*** variando la fracción inhalada (salvo que haya sido determinada en el ***Paso 7.10***).

A este paso se puede haber llegado desde el ***Paso 7.11.1***, porque no se haya obtenido un ajuste aceptable con un solo tipo de absorción. Si la fracción inhalada se ha determinado en el ***Paso 7.10***, entonces hay que probar (inspección, prueba y error) con una mezcla de los diferentes tipos de absorción. Si con más de una mezcla se obtienen ajustes aceptables, (***Etapa 7C***, ***Paso 7.15***), la mezcla de tipos de absorción que proporcione un mejor ajuste será la que se elija (el mejor ajuste será aquel que proporcione el mayor ***p-valor*** siempre que el ajuste sea también aceptable a ojos del evaluador).

Alternativamente, se puede haber llegado a este paso a través de los ***Pasos 7.11.1*** y ***7.11.2***, porque la dosis estimada es ***mayor*** de ***6 mSv*** y además se han obtenido más datos. Si esto es así, se repetirá todo lo necesario de este procedimiento hasta obtener un ajuste aceptable, evaluando por este orden: con el tipo de absorción por defecto (***"a priori"***); con otro tipo de absorción y con una mezcla de tipos de absorción, hasta obtener un ajuste adecuado.

Si la fracción inhalada no se determinó en el ***Paso 7.10*** por carecer de información suficiente y no se obtuvo un ajuste aceptable con la fracción inhalada por defecto, (***Paso 7.3***), se repetirá la evaluación con varias mezclas de tipos de absorción y diferentes valores de la fracción inhalada de la actividad total. En cada caso se evaluará la bondad del ajuste (***Paso 7.12.1***). Si se encuentra un ajuste aceptable, es probable que también se encuentren más para otras mezclas de tipos de absorción y fracciones inhaladas de la actividad total, en cuyo caso se elegirá la mezcla que proporcione un mejor ajuste (aquel que ofrezca el mayor ***p-valor*** siempre que el ajuste sea también aceptable a ojos del evaluador).

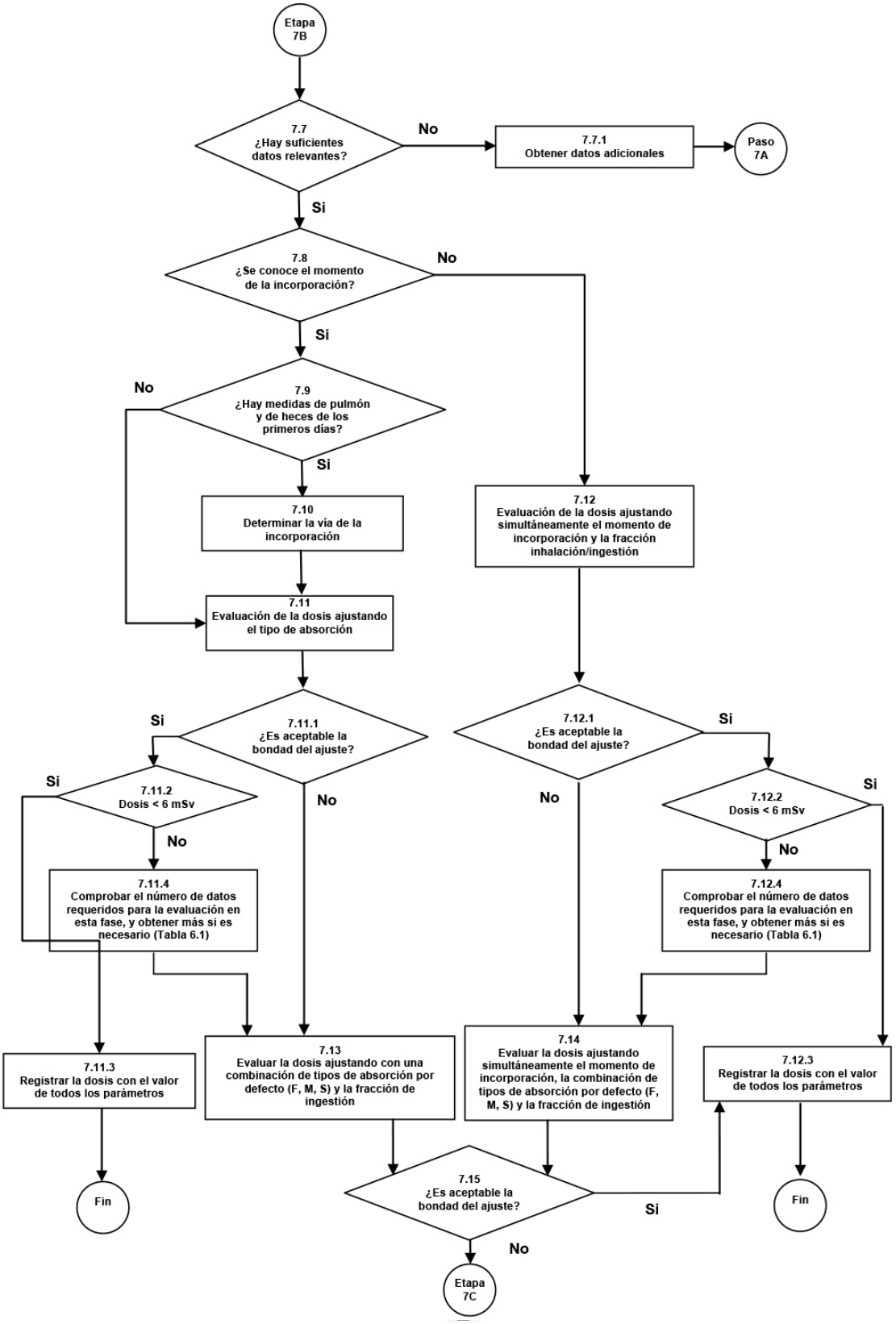


Figura 10.4 Etapa 7B. Procedimiento especial para casos mixtos de inhalación e ingestión por encima del Nivel 1 Parte 2: Variación del tipo de absorción y de la relación entre la actividad inhalada e ingerida y también del momento de la incorporación si fuera desconocido

Paso 7.14. ***Evaluar la dosis ajustando de forma simultánea el momento de la incorporación, una mezcla de tipos de absorción (F, M, S) y la vía de incorporación (fracción inhalada).*** Esto es una extensión del ***Paso 7.12***, para dar una mayor flexibilidad al ajuste considerando una mezcla de tipos de absorción.

A este paso se puede haber llegado del ***Paso 7.12.1***, al no haber encontrado un buen ajuste con ningún momento de la incorporación y con ninguna fracción inhalada de la actividad total. En esta situación, se debe probar con otros tipos de absorción o con una mezcla de tipos de absorción.

Se realizarán nuevas evaluaciones para diferentes momentos de la incorporación abarcando todo el periodo posible de la incorporación, para diferentes fracciones de la actividad inhalada y para cada uno del resto de los tipos de absorción por defecto disponibles del elemento (como en el ***Paso 7.11***). En cada caso se verificará la bondad del ajuste (***Etapa 7C***, ***paso 7.15***). Si se encuentra un ajuste aceptable, es probable que también se encuentren otros para más momentos de la incorporación y más fracciones de la actividad inhalada. Se elegirá aquella combinación del momento de la incorporación, tipo de absorción y fracción inhalada de la actividad total que proporcione el mejor ajuste (aquel que ofrezca el mayor ***p-valor*** siempre que el ajuste sea también aceptable a ojos del evaluador).

Si no se obtiene un ajuste aceptable se harán nuevas evaluaciones para diferentes momentos de la incorporación abarcando todo el periodo posible de la misma, para diferentes fracciones de la actividad inhalada y para una mezcla de tipos de absorción y en cada caso se realizará una prueba de la bondad del ajuste (***Etapa 7C***, ***paso 7.15***).

Si se encuentra un ajuste aceptable, es probable que también se encuentren otros para diferentes momentos de la incorporación y fracciones de la actividad inhalada. Se elegirá aquella combinación del momento de la incorporación, de mezcla de tipos de absorción y de fracción inhalada de la actividad total que proporcione el mejor ajuste (aquel que ofrezca el mayor ***p-valor*** siempre que el ajuste sea también aceptable a ojos del evaluador).

De manera alternativa, se puede haber llegado a este paso desde los ***Pasos 7.12.1 y 7.12.2***, porque la estimación de la ***dosis*** es ***superior*** a ***6 mSv*** y además se han obtenido más datos. Si esto es así, se repetirá todo lo necesario de este procedimiento hasta obtener un ajuste aceptable. Se llevará a cabo la evaluación cambiando: ***(i)*** el momento de la incorporación por defecto (***"a priori"***), el tipo de absorción por defecto y la fracción inhalada; ***(ii)*** variando el momento de la incorporación y la fracción inhalada pero manteniendo el tipo de absorción por defecto (repetición del ***Paso 7.12***); y ***(iii)*** variando el momento de la incorporación y diferentes tipos de absorción y de fracciones inhaladas; ***(iv)*** variando el momento de la incorporación, con una mezcla de tipos de absorción y fracciones inhaladas de la actividad total.

Paso 7.15. ***¿Es aceptable la bondad del ajuste?*** Si la bondad de ajuste es aceptable (es decir el ajuste no es rechazado por los criterios del ***Apartado 6.3***), entonces la estimación de la incorporación se acepta como su mejor estimación. La dosis efectiva se calculará entonces con los mismos parámetros del modelo que se utilizaron en la evaluación de la actividad incorporada. Sin embargo, si el ajuste no es aceptable, se deberá continuar con el ***Paso 7.16***.

10.4 Evaluación avanzada (Etapa 7C)

En esta etapa se lleva a cabo una evaluación avanzada. Se aplica en aquellos casos en los que se dispone de un conjunto completo de datos. El aspecto fundamental en este caso es que se ajustan de forma sistemática y en un orden específico valores de algunos parámetros de los modelos biocinéticos hasta que se obtenga un ajuste aceptable (el ajuste no es rechazado por los criterios específicos). Si el ajuste es aceptable se acepta la estimación de la incorporación como su mejor estimación y la dosis se calcula con los mismos valores de parámetros que los utilizados en la estimación de la incorporación. Se registran los resultados de la incorporación y de la dosis efectiva comprometida junto con los correspondientes valores de los parámetros (***Paso 7.12.3***). Por tanto, después de cada paso en el que se modifique el valor de algún parámetro (***Pasos 7.16*** a ***7.20***), hay un paso correspondiente para comprobar la bondad del ajuste (***Pasos 7.16.1*** al ***7.20.1*** respectivamente), y puesto que son muy similares al ***Paso 7.15***, se omite el texto explicativo.

Al principio de esta etapa, se debe haber determinado la vía de incorporación (fracción inhalada) a través de las medidas tempranas de actividad en pulmones y en heces (***Paso 7.10***), en cuyo caso esto no se modificará en esta fase. Si no se ha hecho, se determinará ajustando de forma simultánea las predicciones de los modelos a los datos de las medidas con el momento de la incorporación y/o con una mezcla de tipos de absorción (***Pasos 7.13*** o ***7.14***). En ese caso, si el valor de cualquier parámetro se cambia en algún paso siguiente, habrá que reevaluar la fracción inhalada.

De igual modo, si el momento de la incorporación se desconoce, se debería haber determinado al principio de esta etapa ajustando de forma simultánea las predicciones de los modelos a los datos de las medidas con la fracción inhalada y/o con una mezcla de tipos de absorción (***Pasos 7.12*** o ***7.14***). En cualquier caso, si el valor de cualquier parámetro se cambia en algún paso siguiente, habrá que reevaluar el momento de la incorporación.

Se recomienda que en los casos en los que se disponga de varios conjuntos de medidas de diversos tipos de técnicas de bioensayo , se evalúe tanto la incorporación como la dosis ajustando de forma simultánea todos los tipos de datos con las predicciones de los modelos correspondientes.

Paso 7.16. ***Determinar valores específicos para los parámetros de absorción en sangre del modelo pulmonar (HRTM)***. Para materiales moderadamente solubles a muy insolubles (de los ***Tipos M*** o ***S***) determinar valores específicos para f_r y s_s ajustando f_r, s_s y la incorporación a los datos manteniendo fijo el parámetro s_r en el valor recomendado en los documentos ***OIR*** de ***ICRP*** o en la publicación ***68*** de ***ICRP***. Para la mayoría de los materiales no hay evidencia de que exista el estado ligado por lo que fracción f_b se toma igual a ***0***. De todas formas si se hubieran determinado a través de experimentos ***in vivo*** valores relevantes para s_r y/o de f_b y s_b, se utilizarán estos valores experimentales.

Paso 7.17. ***Determinar el valor específico de f_A o en su ausencia de f_1***. Hay que tener en cuenta que es posible tener diferentes valores de f_A/f_1 de un mismo compuesto para ingestión y para inhalación, por ejemplo, valores por defecto de algunos compuestos de uranio y plutonio: compárense los documentos ***OIR*** de ***ICRP*** y/o la publicación ***68*** de ***ICRP Anexos E y F***.

Paso 7.18. ***Determinar valores específicos de las tasas de transporte de partículas del modelo HRTM***. Los valores de los parámetros que describen el transporte de partículas en el tracto respiratorio del modelo ***HRTM*** se fundamentaron en la medida de lo posible, en datos experimentales humanos lo que permite determinar tasas de remoción de la actividad depositada en pulmones hasta un año o más posterior a la inhalación. Sin embargo estos valores fueron escogidos para representar individuos sanos y no fumadores. Los datos experimentales que sirvieron de partida muestran grandes variaciones inter-personales aún entre sujetos sanos y muestran que el transporte es generalmente menor entre fumadores y personas con enfermedades pulmonares, publicación ***66*** de ***ICRP*** (*ICRP-66 1994*). Si se dispone de un conjunto completo de medidas de actividad en pulmones o de excretas en heces, puede ser necesario modificar las tasas de transporte de partículas para mejorar el ajuste de los datos.

Cabe señalar que la modificación de las tasas de transporte de partículas también afecta a la actividad absorbida en sangre, debido a que la remoción de la actividad depositada en pulmones se reparte entre absorción en sangre y transporte al aparato digestivo. Así, en algunos casos, será necesario reajustar los parámetros de absorción del ***HRTM*** (es decir, repetir el ***Paso 7.16***) tras modificar las tasas de transporte de partículas.

Paso 7.19. ***Determinar valores específicos de los parámetros de tránsito del modelo alimentario***. Los parámetros del modelo alimentario de ***ICRP***, ***HATM*** representan valores típicos por lo que puede haber considerables variaciones tanto inter como intra-personas. El tiempo de tránsito a través del tracto gastrointestinal afecta a la actividad retenida en todo el cuerpo y a la actividad eliminada en heces durante los primeros días tras la incorporación por inhalación o ingestión. Si se dispone de datos tempranos completos en estos primeros días, puede ser necesario modificar los valores de los parámetros del modelo del tracto alimentario para obtener un ajuste razonable de los datos con las predicciones del modelo.

Paso 7.20. ***Ajustar valores de los parámetros del modelo sistémico***. De nuevo conviene reseñar que los valores de los parámetros que recomienda ***ICRP*** fueron escogidos para representar valores medios de la población por lo que se pueden dar variaciones entre individuos que den lugar a diferencias entre los valores que predicen los modelos y los valores medidos, con independencia del modelo de que se trate, ya sea del modelo biocinético pulmonar o gastrointestinal. Esto puede ocurrir tanto con materiales muy solubles. como con los actínidos, para los que se pueden observar diferencias entre personas y las predicciones del modelo para la retención en hígado o huesos o para la relación entre la actividad depositada en estos órganos y la actividad excretada en orina.

Hay que destacar que este es el ***último Paso***, de modo que el ajuste de los parámetros del modelo sistémico sólo debe haber sido considerado tras haber modificado los parámetros de los modelos ***HRTM*** y ***HATM*** (pasos ***7.16, 7.17, 7.18*** y ***7.19***). Si la bondad del ajuste no es aceptable de acuerdo con los criterios específicos, consúltese el caso con otros expertos. SI el ajuste final es aceptable, se registrarán los valores de la incorporación y de la dosis efectiva comprometida junto con los valores de los parámetros de los modelos utilizados en la evaluación (***Paso 7.12.3***).

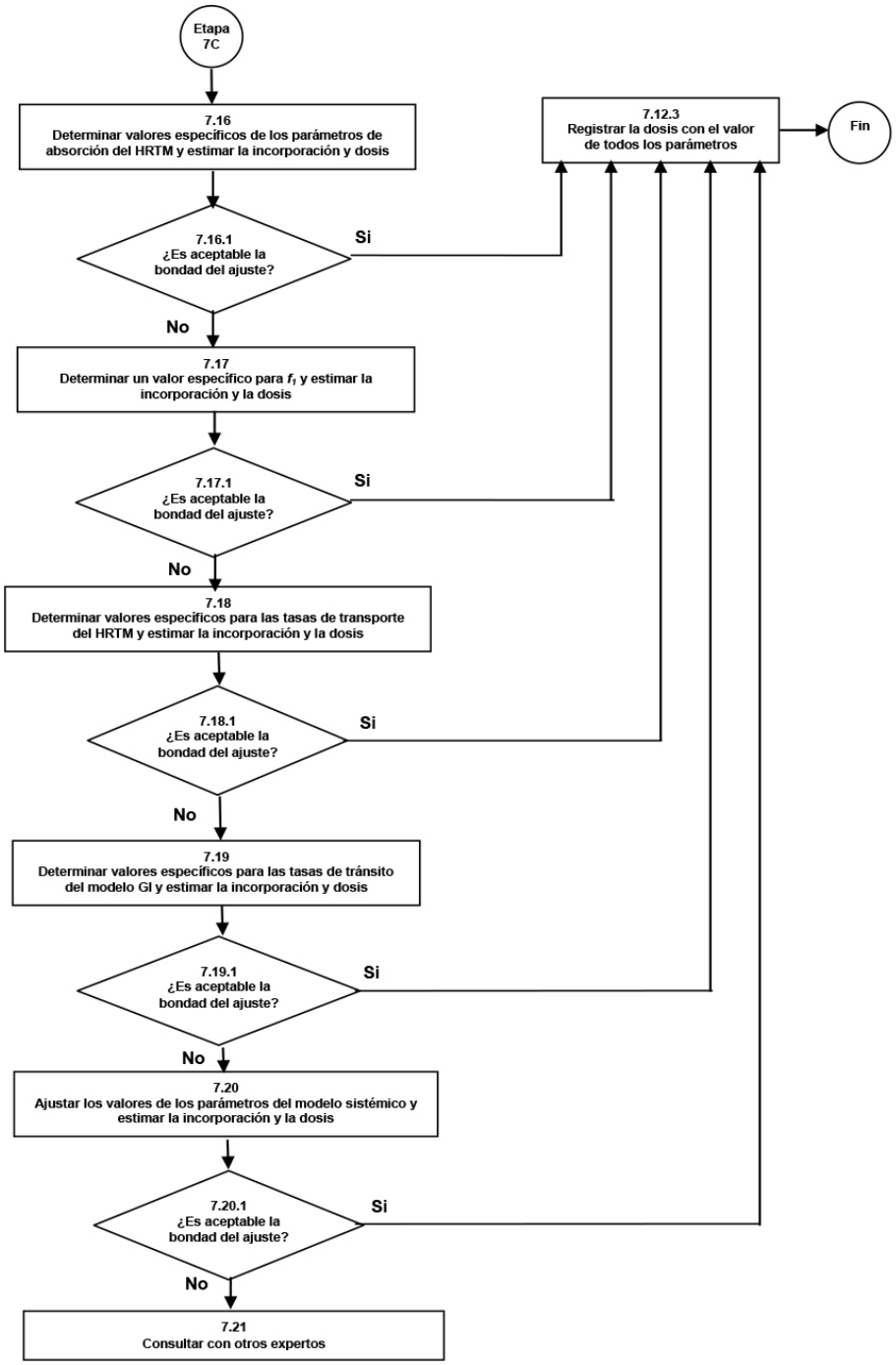


Figura 10.5 Etapa 7C. Procedimiento especial para casos mixtos de inhalación e ingestión por encima del Nivel 1 - Parte 3: Evaluación más sofisticada con ajuste sistemático de los valores de los parámetros de los modelos

11. Heridas (Etapa 8)

11.1 Introducción

Los siguientes diagramas de flujo se introducen en el enfoque estructurado de la ***Guía IDEAS*** para tener en cuenta el caso de heridas contaminadas que pudiera requerir una evaluación especial. La ***Etapa 8A*** se refiere a la evaluación utilizando una de las categorías por defecto elegida a ***priori*** del modelo de heridas de la ***NCRP***. La ***Etapa 8B*** se refiere a la búsqueda de sistemática de una categoría por defecto que mejor ajuste los datos de excreción y la ***Etapa 8C*** considera una mezcla de dos categorías de retención por defecto que ajuste los datos de excreción.

ICRP todavía no ha proporcionado coeficientes de dosis para incorporaciones a través de heridas. Se pueden calcular aplicando conjuntamente el modelo de heridas de la ***NCRP*** (*NCRP 2006*) y los modelos biocinéticos y dosimétricos de ***ICRP*** con un código de cálculo apropiado. Sin embargo los ***coeficientes de dosis por inyección*** correspondientes a una transferencia directa de actividad a través de la piel proporcionan una buena aproximación para los coeficientes de dosis por heridas, excepto en el caso de fragmentos (*Ishigure 2007, Toohey 2001*). Pero aún en el caso de fragmentos, la aplicación de coeficientes de dosis por inyección da como resultado una estimación conservadora de la dosis efectiva. Por tanto se recomienda el uso de los coeficientes de dosis por inyección incluidos en ***NCRP-156*** (*NCRP 2006*) o en el ***Safety Reportes Series 37*** del ***OIEA*** (*OIEA 2004*) o los de los documentos ***OIR*** de ***ICRP*** si no se dispone de un código apropiado.

11.2 Asignación de una categoría por defecto (Etapa 8A)

En la primera etapa se lleva a cabo una evaluación sencilla utilizando valores de los parámetros elegidos ***a priori*** antes de llevar a cabo la evaluación (ver ***Figura 11.1***). Este procedimiento es muy parecido al procedimiento ***estándar*** de la ***Etapa 3***. La principal diferencia radica en que en un procedimiento especial suele haber más de una medida.

Paso 8.1. ***Identificación y preparación de los datos de medida***. Se parte de la base de que habrá más de una medida disponible asociadas al caso en estudio (M_i para $i = 1$ hasta n). Por tanto es importante que las incertidumbres asignadas a los datos sean ***realistas*** ("***factor de dispersión***" ***SF***, ***Paso 2.1***). Puede haber más de un tipo de medida (orina, heces, etc.) y podría haber también más de un radionucleido involucrado en la exposición. Normalmente para un incidente con heridas, el momento de la incorporación es conocido.

Paso 8.2. ***Evaluación de contribuciones de anteriores incorporaciones***. Calcular las contribuciones (P_i) de todas las incorporaciones anteriores en las que se detectó el (los) radionucleido(s) en cuestión, teniendo en cuenta todas las posibles vías de incorporación y todas las incorporaciones de mezclas de radionucleidos en las que fue detectado el radionucleido de interés. Calcular el valor neto ($N_i = M_i - P_i$) de la mediad del radionúclido restando P_i del valor medido M_i.

Paso 8.3. ***Asignación de parámetros a priori de acuerdo con la categoría apropiada del modelo NCRP para heridas***. Se asignará una categoría del modelo de heridas de la ***NCRP*** y se utilizarán los valores por defecto de los parámetros correspondientes. Se elige la categoría del modelo ***NCRP*** sobre la base del comportamiento en el tiempo de la magnitud que se mide (p.e. la excreción diaria en orina). Así por ejemplo, para los isótopos de plutonio se debe elegir la categoría "***Soluble Fuerte***" para comportamientos decrecientes de la excreción urinaria; para excreción urinaria casi constantes se utilizará "***Coloide***" y finalmente para excreciones urinarias crecientes con el tiempo se usarán las categorías de "***Partículas***" o "***Fragmentos***".

Paso 8.4. ***Cálculo de la dosis con parámetros a priori*.** Usando los valores asignados "***a priori***" de los parámetros, se obtiene una estimación de la incorporación I_i dividiendo el valor neto de la medida $N_i = M_i - P_i$ por la función de excreción $m(t_i)$ apropiada, enlazando el modelo de heridas de la ***NCRP*** con el modelo sistémico apropiado correspondiente*.* Se utilizarán las ecuaciones presentadas en el ***Paso 5.5*** de la ***Etapa 5A***. Utilizando los mismos valores asignados ***a priori*** de los parámetros (tanto para el modelo de heridas como para el sistémico), se calcula la dosis efectiva comprometida multiplicando la "***mejor estimación***" de la actividad inicial en la herida por el coeficiente de dosis apropiado (dosis por unidad de actividad inicial en la herida). Para el ***Pu-239***, se puede aplicar el coeficiente de dosis de inyección intravenosa para todas las categorías del modelo de heridas de la ***NCRP*** porque proporciona una estimación conservadora, salvo para la categoría de "***Fragmentos***".

Paso 8.5. Si la efectiva comprometida estimada en el ***Paso 8.4*** (para la incorporación que se está evaluando teniendo en cuenta todos los datos disponibles de medidas) es menor de ***1 mSv*** no hay necesidad de seguir con la evaluación (***Paso 8.5.1***). Si no fuera así se necesitan otros procedimientos especiales (***Etapa 8B***) para una evaluación más detallada del caso.

Paso 8.5.1. Se registran o se recogen los resultados obtenidos en el ***Paso 8.4*** en términos de actividad depositada en la herida y dosis efectiva comprometida junto con los valores que se han empleado de los parámetros correspondientes a la categoría utilizada del modelo de heridas de la ***NCRP*** (del ***Paso 8.3***).

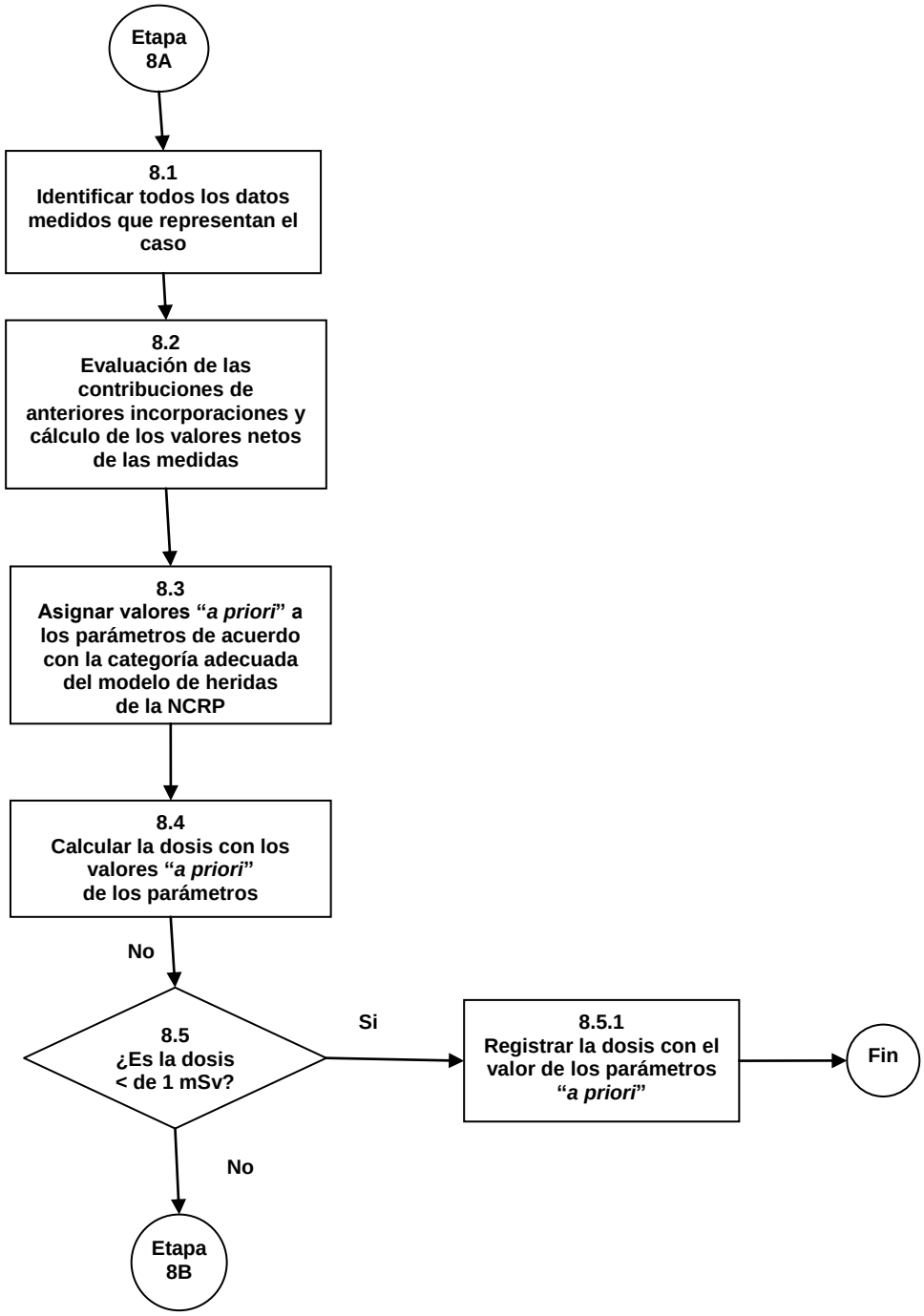


Figura 11.1 Etapa 8A. Procedimiento especial para casos de heridas por encima del Nivel 1 Parte 1: Evaluación sencilla utilizando valores de los parámetros escogidos *a priori*

11.3 Ajuste con las categorías por defecto (Etapa 8B)

En esta etapa se describe un procedimiento para tratar de ajustar los datos para las diferentes categorías por defecto del modelo de heridas de la ***NCRP*** comparando los resultados del ajuste con las medidas obtenidas (***Figura 11.2***). Si no se consigue un ajuste aceptable con los valores asignados de los parámetros, se deberá probar con una combinación de las categorías por defecto según se indica en la ***Etapa 8.C*** (***Figura 11.3)***.

En esta ***Etapa 8B*** y en la ***8C*** que sigue a continuación, se eligen o mezclan diferentes categorías del modelo de heridas de la ***NCRP*** y la evaluación de la dosis se lleva a cabo sobre la base del ***ajuste*** de las predicciones del modelo con las observaciones (***datos***). Se realiza una comprobación para verificar si el ajuste es correcto y decidir entonces finalizar la evaluación o continuar con ella con pasos adicionales. La medida de la "***bondad del ajuste***" y el criterio para decidir si el ajuste es suficientemente bueno, son por tanto cuestiones críticas. Es importante que se disponga de suficientes medidas para la evaluación de una dosis significativa, y cuanto mayor sea la dosis, mejores deberán ser los datos. Por ello se hacen propuestas para decidir sobre el mínimo número de datos que serían aceptables ("***suficiente***", ver ***Apartado 6.5***).

Paso 8.6. ***¿Hay suficientes datos*?** Como ya se ha indicado anteriormente en el ***Apartado 6.5,*** el criterio para decidir si el número (y tipos) de datos disponibles es suficiente así como la duración del periodo de vigilancia depende de la dosis. En este paso, el número apropiado de datos es el correspondiente al rango ***1 mSv < D < 6 mSv***.

Paso 8.7. ***Adquirir nuevos datos de medidas***. Se está suponiendo que la evaluación se está llevando a cabo en tiempo real, de manera que existe la oportunidad de obtener nuevas medidas adicionales si las disponibles son insuficientes. (Para casos históricos, en donde no es posible conseguir más medidas, se registrará que los datos son insuficientes, y, por tanto, el resultado final de la incorporación y de la dosis deberán ser tratados con cautela). Una vez obtenidos los nuevos datos, se realizará de nuevo una evaluación sencilla según la ***Etapa 8A***.

Paso 8.8. ***Suponer la categoría "Soluble Débil" del modelo NCRP para heridas***. Este es el primer paso para la evaluación sistemática con las diferentes categorías por defecto del modelo ***NCRP*** para heridas. En este paso se deben calcular los valores de las magnitudes medidas (p.e. para la excreción urinaria diaria) por unidad de actividad depositada en la herida para la categoría por defecto del modelo de heridas de la ***NCRP*** acoplado al modelo sistémico que aplique.

Paso 8.9*.*Calcular la dosis con los parámetros de la categoría por defecto del modelo de heridas de la NCRP. Con los valores de la función de retención calculados en el ***Paso 8.8*** se realiza una estimación de la actividad depositada en la herida utilizando también las ecuaciones del ***Paso 5.5*** de la ***Etapa 5A***. La dosis efectiva comprometida se calcula utilizando el ***coeficiente de dosis*** en ***Sv/Bq***. (Ver apunte del ***Paso 8.4*** relativa al ***Pu-239***).

Paso 8.10. ***¿Es aceptable la bondad del ajuste?*** Si la bondad de ajuste es aceptable (es decir el ajuste no es rechazado por los criterios del ***Apartado 6.3***) ir al ***Paso 8.11***. La estimación de la actividad depositada se

acepta como su mejor estimación. De lo contrario, proceder con el ***Paso 8.12*** para iniciar un proceso iterativo de prueba con el resto de categorías del modelo de heridas de la ***NCRP***.

Paso 8.11. ***¿Es la dosis inferior a 6 mSv?*** Si la ***dosis efectiva*** estimada en el ***Paso 8.9*** es ***inferior*** a ***6 mSv***, no hay necesidad de realizar una investigación más a fondo (***Paso 8.11.1***). Pero si la ***dosis*** es ***superior*** a ***6 mSv***, entonces se necesitan procedimientos especiales adicionales para una evaluación más detallada del caso (***Etapa 8C***).

Paso 8.11.1. ***Registrar la dosis con todos los parámetros***. Se registran los resultados de la actividad depositada en la herida y de la dosis efectiva comprometida del ***Paso 8.9*** junto con los correspondientes valores de los parámetros.

Paso 8.12. ***Probar con otra de las categorías por defecto del modelo NCRP para heridas***. Iterativamente probar con "***Soluble Moderado***", "***Soluble Fuerte***", "***Soluble Ávido***", "***Coloide***" y "***Fragmento***". Usar en cada caso los valores por defecto de los parámetros de la categoría del modelo de heridas.

Paso 8.13. ***¿Se ha probado con todas las categorías por defecto del modelo NCRP para heridas?*** Si no fuera así, volver al ***Paso 8.9*** y calcular con una nueva categoría por defecto. Si por el contrario se ha hecho la evaluación con las ***7 categorías*** del modelo ***NCRP*** para heridas, ir a la ***Etapa 8C***.

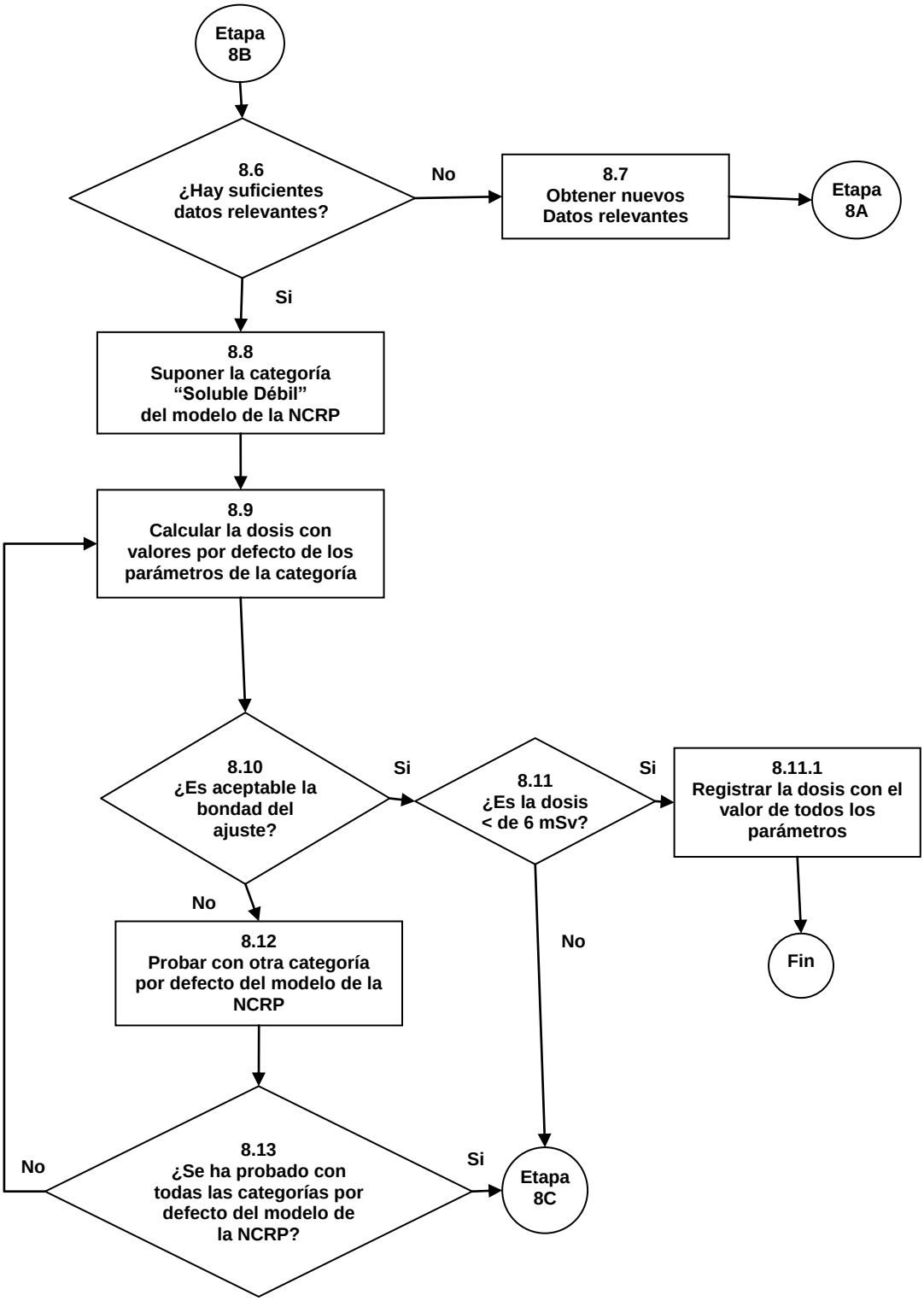


Figura 11.2 Etapa 8B. Procedimiento especial para casos de heridas por encima del Nivel 1
Parte 2: Evaluación haciendo uso de las diferentes categorías por defecto del modelo NCRP para heridas

11.4 Combinación de dos de las categorías por defecto del modelo NCRP para heridas (Etapa 8C)

A esta ***Etapa 8C*** se puede haber llegado desde el ***Paso 8.11*** con un ajuste aceptable pero con una dosis efectiva comprometida superior a ***6 mSv*** o desde el ***Paso 8.13*** tras haber probado con las ***7 categorías*** por defecto del modelo ***NCRP*** para heridas. En esta etapa se determinan las funciones de retención $m_i(t)$ por unidad de actividad depositada en la herida mediante una combinación lineal de funciones de retención asociadas a las diferentes categorías del modelo ***NCRP*** de heridas empleando el mismo modelo sistémico.

Paso 8.14. ***Comprobar el número de datos requeridos para una evaluación en este nivel y obtener más en caso necesario***. Esto es similar al ***Paso 8.7***. Como ya se ha indicado anteriormente en el ***Apartado 6.5,*** el criterio para decidir si el número (y tipos) de datos disponibles son suficientes, así como la duración del periodo de vigilancia depende de la dosis. En este paso, el número apropiado de datos es el correspondiente a una dosis ***D > 6 mSv***.

Se está suponiendo que la evaluación se está llevando a cabo en tiempo real, de manera que existe la oportunidad de obtener nuevas medidas adicionales si las disponibles son insuficientes. (Para casos históricos, en donde no es posible conseguir más medidas, se registrará que los datos son insuficientes, y por tanto el resultado final de la incorporación y de la dosis deberán ser tratados con cautela). Una vez obtenidos los nuevos datos, se necesita procedimientos especiales adicionales (***Pasos 8.15*** en adelante) para una evaluación más detallada del caso.

Paso 8.15. ***Evaluación de la dosis ajustando con una mezcla de dos categorías "Solubles"***. Esto es una extensión del ***Paso 8.9*** para tener mayor flexibilidad con el ajuste al considerar una mezcla de las categorías solubles del modelo ***NCRP*** para heridas. A este paso se puede haber llegado desde el ***Paso 8.13*** porque no se obtuvo un ajuste aceptable con ninguna de las categorías por defecto del modelo ***NCRP*** para heridas. En este caso se debe probar con una mezcla de categorías del modelo ***NCRP*** para heridas por el método de prueba y error. Utilizar una mezcla de dos categorías solubles por el orden siguiente: "***Débil + Moderada***", "***Moderada + Fuerte***", "***Fuerte + Ávida***". Si más de una mezcla de categorías ajusta los datos, se escogerá aquella mezcla que proporcione el mejor ajuste (aquel para el que se obtenga el mayor ***p-valor*** y que a los ojos del evaluador, el ajuste sea aceptable).

Alternativamente se puede haber llegado a este paso desde el ***Paso 8.11*** porque la ***dosis*** estimada era ***superior*** a ***6 mSv***. En este caso iniciar la evaluación utilizando la categoría con la que se obtuvo un buen ajuste en el ***Paso 8.10*** e ir incrementado la fracción relativa de la otra categoría empezando por una contribución nula.

Paso 8.16. ***¿Es aceptable la bondad del ajuste?*** Si la bondad de ajuste obtenido con una mezcla de categorías es aceptable (es decir el ajuste no es rechazado por los criterios del ***Apartado 6.3***) ir al ***Paso 8.16.1*** para registrar la dosis con todos los parámetros. De lo contrario, proceder con el ***Paso 8.17***. Si se hubieran obtenido otros ajustes aceptables con los criterios del ***Apartado 6.3***, utilizar como mejor incorporación aquella que proporciones el mayor ***p-valor*** basado en la prueba del X_0^2 y que a ojos del evaluador, el ajuste sea aceptable.

Paso 8.16.1. ***Registrar la dosis con todos los parámetros***. Se registran los resultados de la actividad depositada en la herida y de la dosis efectiva comprometida del ***Paso 8.15*** junto con los correspondientes valores de los parámetros utilizados en el cálculo.

Paso 8.17. ***Evaluación de la dosis ajustando una mezcla del resto de categorías del modelo NCRP para heridas según se indica en este paso***. Esto es una extensión del ***Paso 8.15*** para tener mayor flexibilidad con el ajuste al considerar una mezcla de las categorías insolubles del modelo ***NCRP*** para heridas. Utilizar una mezcla de estas categorías por el orden siguiente: "***Soluble Fuerte + Coloide***", "***Coloide + Partícula***", "***Partícula + Fragmento***". Si más de una mezcla de categorías ajusta los datos, se escogerá aquella mezcla que proporcione el mejor ajuste (aquel para el que se obtenga el mayor ***p-valor*** y que a ojos del evaluador el ajuste sea aceptable).

Paso 8.18. ***¿Es aceptable la bondad del ajuste?*** Si la bondad del ajuste obtenido con una mezcla de las categorías en el ***Paso 8.17*** es aceptable (es decir el ajuste no es rechazado por los criterios del ***Apartado 6.3***) ir al ***Paso 8.18.1*** para registrar la dosis con todos los parámetros. De lo contrario, proceder con el ***Paso 8.19***.

Paso 8.18.1. ***Registrar la dosis con todos los parámetros***. Se registran los resultados de la actividad depositada en la herida y de la dosis efectiva comprometida del ***Paso 8.15*** junto con los correspondientes valores de los parámetros utilizados en el cálculo.

Paso 8.19. ***Consultar con otros expertos***. Si no fuera posible ajustar los datos con ninguna mezcla de las categorías por defecto del modelo de heridas de la ***NCRP***, consultar con otros expertos. El diagrama de flujo de la etapa ***8C*** se muestra en la figura ***11.3***.

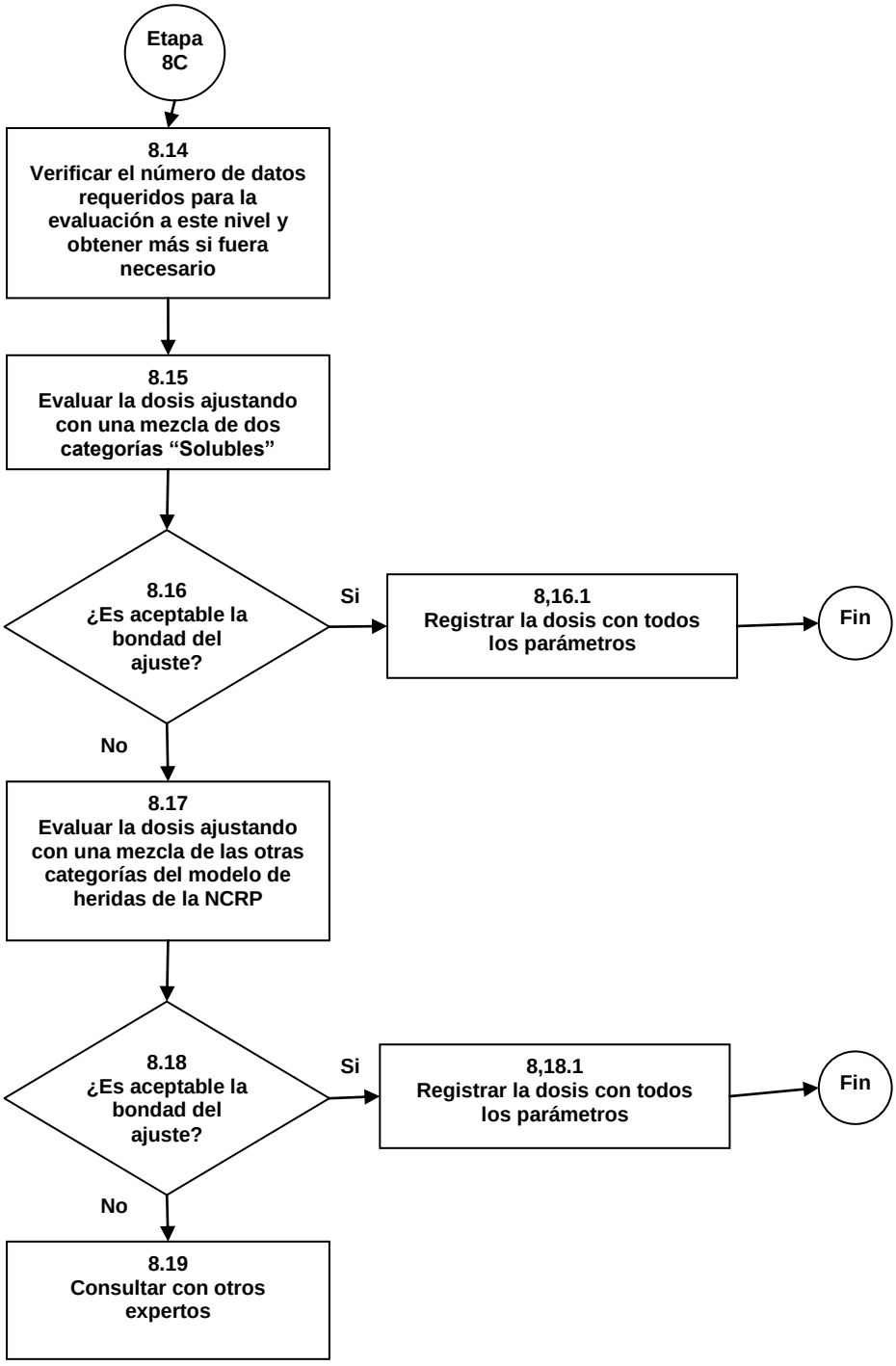


Figura 11.3 Etapa 8C. Procedimiento especial para casos de heridas por encima del Nivel 1
Parte 3: Evaluación haciendo uso de mezclas de las diferentes categorías por defecto del modelo NCRP para heridas

12. Casos especiales con evaluación directa de la dosis

12.1 Teoría

La incorporación, la dosis equivalente y la dosis efectiva se calculan con modelos dosimétricos y biocinéticos. Específicamente, los modelos biocinéticos se utilizan para predecir las magnitudes de bioensayo y para calcular los valores de $U_s(50)$*, es decir del número de transformaciones nucleares en 50 años en el órgano fuente ***S***. Las unidades de $U_s(50)$ vienen dadas en ***Bq.s***.

La dosis equivalente H_M^T a un órgano blanco ***T*** del ***Hombre de Referencia***, vendrá dada por:

$$H_T^M(50) = \sum_S SEE^M(T \leftarrow S) U_S(50) \qquad (12.1)$$

En donde $SEE^M(T \leftarrow S)$ es la ***Energía Efectiva Específica*** para el ***Hombre de Referencia***, que a su vez es la dosis equivalente en el órgano blanco ***T*** por cada transformación nuclear en el órgano fuente ***S***. Las unidades de $SEE^M(T \leftarrow S)$ son Sv por transformación nuclear = $Sv(Bq.s)^{-1}$.

Conociendo la dosis equivalente de cada uno de los órganos o tejidos blanco del hombre y de la mujer de referencia, se puede determinar la dosis efectiva por medio de la ecuación 1.1 del apartado 1.1, es decir por:

$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H_T^H + H_T^M}{2} \right]$$

En casos especiales, se puede determinar directamente $U_s(50)$ de los datos de las medidas sin tener que hacer uso de un modelo biocinético; y esto es lo que se denomina ***método directo de evaluación de dosis***. Dicho de otra forma, $U_s(50)$ se calculan directamente a través de los datos de las medidas que a su vez son un reflejo de las características biocinéticas del individuo en cuestión. Sin embargo, de acuerdo con la ***Publicación 103*** de ***ICRP*** (*ICRP, 2007*), el método directo de estimación de dosis no se debe utilizar para la determinación de la dosis efectiva puesto que esta magnitud está definida para la ***persona de referencia*** por lo que no se pueden emplear en su cálculo parámetros específicos del individuo que se está midiendo. No obstante, este método directo de estimación de dosis se describe en este apartado de la guía porque es un procedimiento apropiado para el cálculo de dosis en algunos casos.

(*) Aunque los autores de la Guía son conscientes de la nueva notación introducida por la publicación ***MIRD Pamphlet 21*** (*MIRD 2009*), la notación del capítulo presente está basada en las indicaciones de la ***Publicación 78*** de ***ICRP***. Las equivalencias utilizadas aquí son: $S_w(r_T \leftarrow r_S, t)$ por $SEE(T \leftarrow S)$ y $\tilde{A}(r_S, T_D)$ por $U_S(50)$.

El método directo de estimación de dosis solo es aplicable si:

- La actividad está uniformemente distribuida por todo el cuerpo como en el caso de agua tritiada ***HT0***, o la actividad se puede medir en un órgano que es el principal contribuyente a la dosis efectiva (por ejemplo en tiroides para los isótopos del yodo), y si;
- la contribución a la dosis de los hijos radiactivos del radionucleido padre es despreciable o esos hijos están en equilibrio secular con el radionucleido padre.

Si la función de retención en el órgano fuente ***S*** (que puede ser todo el cuerpo) se puede aproximar a partir de las medidas efectuadas, entonces $U_S(50)$ se puede calcular integrando la función de retención $A_S(T)$.

$$U_S(50) = \int_{t_i}^{t_f} A_S(t)dt \qquad (12.2)$$

En donde

t_i y t_f son el inicio y final del periodo sobre el que se calcula la dosis comprometida y

$A_S(t)$ es la función de retención en Bq en el órgano fuente ***S***.

Para aplicar este método hace falta tener un número suficiente de medidas que permitan poder hacer una buena aproximación de la función de retención $A_S(t)$. Se pueden producir errores al interpolar datos o al extrapolarlos para tiempos anteriores o posteriores a los de las medidas experimentales. Si se dispone de medidas suficientes, se sugiere utilizar el método de interpolación lineal, es decir, el método de los trapecios. En estos casos, por tanto, el área debajo de las medidas obtenidas viene dada aproximadamente por:

$$\int_I^{t_F} A_S(t)dt = \frac{b}{2}\sum_{i=0}^{n-1}(M_i + M_{i+1}).(t_{i+1} + t_i) \qquad (12.3)$$

Donde

M_i es la medida de actividad en el órgano ***S*** en el momento t_i

T_i es el tiempo o momento de la medida correspondiente a M_i en unidades de días ($t_0 = t_I$ y $t_n = t_F$)

n es el número total de medidas, y

b es la constante numérica que convierte días en segundos: ***b = 86400 s/d***

Si las dosis antes de la primera medida y después de la última no son despreciables, esas partes de la función de retención se deben estimar suponiendo ciertas hipótesis. La retención tras la última medida se puede estimar considerando el periodo efectivo en ese órgano o región fuente en caso que se conozca. De forma alternativa, se puede optar por una posición conservadora suponiendo que tras la última medida solo está presente el decaimiento físico sin eliminación biológica del organismo.

En general, este método solo se puede aplicar en aquellos radionucleidos que se pueden medir externamente, por ejemplo con un contador de cuerpo entero. Sin embargo, para algunos otros radionucleidos, la actividad en todo el cuerpo se puede determinar a través de la medida de actividad en

excretas. Este es el caso del agua tritiada ***HTO*** para el que se asume con lógica que la concentración de Tritio en el agua de todo el organismo es la misma que la de la orina. En la práctica, este método directo de estimación de dosis solo se aplica a (i) medida de ***HTO*** en todo el cuerpo a través de la actividad en orina, (ii) formas solubles de cesio a través de la medida de actividad en todo el cuerpo y (iii) isótopos de yodo a través de la medida de actividad del tiroides.

Sin embargo, este método no se puede utilizar para determinar la dosis en pulmones a través de la medida de su actividad; y esto es así porque según el modelo ***HRTM***, la dosis de los pulmones es una dosis ponderada de las dosis de las distintas regiones del tracto respiratorio y la actividad de cada una de esas regiones no se puede evaluar de forma independiente con medidas externas; es decir, la dosis efectiva no se puede determinar de forma directa si está dominada por la dosis en pulmones.

12.2 Aplicación de la evaluación directa de la dosis a la incorporación de agua tritiada

La mayoría de los programas de vigilancia de exposición interna por agua tritiada consisten en la medida de la concentración de ***H-3*** en muestras de orina. La dosis efectiva resultante de la incorporación de ***HTO*** se puede evaluar por este método directo de estimación de dosis. El método implica calcular el área bajo la curva de concentración de ***H-3*** en orina para determinar el número de transformaciones nucleares.

ICRP supone que el agua tritiada ***HTO*** pasa instantáneamente a la sangre tras su incorporación por inhalación o ingestión y desde la sangre se mezcla rápidamente y de forma uniforme con todo el contenido de agua del organismo. Estudios en humanos llevados a cabo con deuterio o HTO, han confirmado que al cabo de una hora se ha equilibrado ya la concentración por todo el organismo. A efectos dosimétricos, se puede suponer que la concentración de actividad en orina (***Bq/l***) es la misma que la del resto de agua del organismo. Por tanto, la actividad en todo el cuerpo es igual a la concentración de actividad en orina multiplicada por el volumen total de agua del organismo que para el hombre de referencia es de ***42 litros*** (***ICRP Publicación 23*** (*ICRP-1975*))[(+)].

[(+)]Hay que notar que se puede calcular un valor de ***42,6 litros*** para el volumen total de agua de cuerpo humano del hombre de referencia basándose en los valores dados en la ***Publicación 89 de ICRP*** (*ICRP-2002a*). Los valores de referencia para el contenido en tejido no graso en adultos es del 73% y se supone que casi todo el contenido de agua del organismo está contenido en el tejido no graso (magro). Típicamente el tejido no graso representa el 80% de la masa total del cuerpo en el varón al principio de su edad adulta. El valor de referencia de la masa total del cuerpo en el adulto varón es de 73 kg. Por tanto, suponiendo la unidad para la densidad del agua (1 kg/l), el volumen total de agua del cuerpo para el hombre de referencia será 73 kg x 0,8 x 0,73 / 1kg/l = ***42,6 l***. Ver apartados 4.3.1.y 4.3.2 de la ***Publicación 89*** de ***ICRP*** (*ICRP-2002a*))

El área bajo la curva que represente la actividad total en todo el cuerpo proporciona el número de transformaciones nucleares en todo el cuerpo.

Si A_u es el área bajo la curva que represente los datos de concentración de actividad en orina en ***Bq.d/l*** desde el momento de la primera incorporación en ***t=0*** hasta el infinito, entonces el número total de transformaciones nucleares U_s vendrá dado por

$$U_s = A_u.42.b \quad (12.4)$$

Siendo ***b*** la constante numérica que convierte días en segundos; ***b = 86400 s/d***.

La incorporación total ***I*** se puede determinar sencillamente calculando la cantidad total de actividad eliminada por el cuerpo. La ***Publicación 89*** de ***ICRP***, ***tabla 2.30*** (*ICRP-2002a*) indica que cada día se pierden del cuerpo ***2.9 litros*** de agua, por tanto la incorporación será:

$$I = 2{,}9.A_u \ Bq$$

Este método directo de estimación de dosis no depende de un modelo biocinético puesto que U_s se obtienen directamente calculando A_u a través de las medidas de concentración de actividad en orina. Si se dispone de suficientes medidas, se sugiere utilizar la interpolación lineal, por ejemplo, el método de los trapecios para integrar. En tales casos, el área A_u en ***Bq.d/l*** bajo los datos de las medidas se puede aproximar por:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \frac{(C_{i+1}+C_i)(t_{i+1}-t_i)}{2} \ Bq.l^{-1}.d \quad (12.5)$$

Donde

C_i es la concentración de actividad de ***HTO*** (***Bq/l***) de la muestra ***i*** de orina

T_i es el día correspondiente a la toma de la muestra ***i*** de orina

n es el número total de muestras de orina

Si los datos de las medidas cubren un periodo de tiempo mucho mayor que el periodo efectivo del Tritio en el cuerpo (***4-18 días***), ***Publicación 56 de ICRP*** (*ICRP-1989*), y el valor numérico del último dato disponible es relativamente pequeño, el error causado al no extrapolar para tiempos posteriores es insignificante. Si no fuera así, la retención tras la última medida se puede estimar considerando un periodo biológico de ***10 días*** en todo el cuerpo. Por tanto, el área extrapolada será:

$$C_n \times 10/\ln(2) \ Bq.d/l \quad (12.6)$$

En estos casos en los que es necesaria la extrapolación, la dosis extra procedente de los componentes de periodo intermedio y largo debida al proceso por el cual el ***HTO*** queda ligado orgánicamente en el cuerpo, también se puede considerar. En el año 2003, Taylor propuso un modelo para la retención del ***HTO*** en el organismo con tres componentes exponenciales, con periodos de ***10 días*** (99 %), ***40 días*** (0,98 %) y ***350 días*** (0,02 %). En este modelo la dosis del tritio ligado orgánicamente es solo un 5 % del HTO circulante en el agua del cuerpo, por tanto, para tener en cuenta la dosis del tritio ligado en forma orgánica, solo hay que incrementar la dosis del ***HTO*** en un 5 %, es decir multiplicarla por ***1,05***.

Incorporación única

Para incorporaciones únicas de Tritio, conocido el momento de la incorporación, se puede mejorar la estimación de A_u ajustando los datos de las medidas de concentración de actividad en orina (***Bq/l***) con una suma de términos exponenciales ***f(t)***. Hay que tener cuidado de que tanto los coeficientes de ***f(t)*** como los periodos sean razonables. Por ejemplo, es de esperar que el componente de periodo corto tenga un periodo de alrededor de 10 días (un rango entre 4-18 días) y que contabilice más del 90% de la dosis efectiva (*ICRP, 1989*).

Por tanto, si la función ***f(t)*** que ajusta las medidas está definida de la siguiente manera:

$$f(t) = \sum_{i=1}^{n} a_i e^{-\lambda_i t} \; Bq/l$$

siendo ***t*** el tiempo en días tras la incorporación única. Entonces la incorporación ***I*** vendrá dada por:

$$I = 42 \sum_{i=1}^{n} a_i \, Bq$$

Por otro lado A_u se puede calcular integrando ***f(t)*** entre 0 e infinito:

$$A_u = \sum_{i=1}^{n} \frac{a_i}{\lambda_i} \; Bql^{-1}d \qquad (12.7)$$

El número total de transformaciones nucleares U_s se determina sustituyendo A_u de la fórmula 12.7 en la fórmula 12.4.

Energía Efectiva Específica (SEE) para el Hombre de Referencia

Los valores de $SEE^H(OB \leftarrow TC)$ (*OB = órgano blanco y TC= todo el cuerpo*) para el ***HTO*** pueden calcularse para el hombre de referencia suponiendo que el Tritio se distribuye uniformemente por todo el cuerpo (TC) considerado como órgano fuente. EL valor de $SEE^H(OB \leftarrow TC)$ es idéntico para todos los órganos blanco y puede calcularse como sigue.

La energía media β por transformación nuclear (***tn***) del Tritio toma el valor de 5,68 keV. Puesto que 1 eV es igual a 1,602E-19 julios, se tendrá que 5,68 keV/tn = 9,1E-16 J/tn.

El valor de referencia para la masa total del cuerpo del adulto varón de referencia según la ***Publicación 89*** de ***ICRP*** (*ICRP-2002a*) es de 73 kg. El peso del órgano correspondiente a todo el cuerpo se obtiene restando a este peso de 73 kg el peso de los contenidos de los órganos del tracto alimentario y de la vesícula biliar, que según la Publicación ***89 del ICRP*** (ICRP, 2002a) tienen los valores de:

- Contenido del estómago = 250 g
- Contenido del intestino delgado = 350 g
- Contenido del intestino grueso = 300 g
- Contenido de la vesícula biliar = 58 g

En total el peso de los contenidos de estos órganos es de 958 g con lo que el peso del órgano Todo el Cuerpo es de 72,042 kg. Puesto que el factor de ponderación de la radiación beta es la unidad, se tendrá que:

$$\boldsymbol{SEE^{H}(OB \leftarrow TC) = \frac{9,1.10^{-16}\, J/tn}{72,042\, kg} = 1,26.10^{-17}\, Sv/tn}$$

NOTA de la traducción:

Sin embargo, ***ICRP*** utiliza este otro valor de la ***SEE*** para el Tritio; ***1,32E-17 Sv/tn***. La diferencia procede de que los valores actuales del coeficiente de dosis por incorporación de Tritio (1,8 E-11 Sv/Bq) están basados en datos fisiológicos y anatómicos de la ***Publicación 23*** de ***ICRP*** (*ICRP, 1975*) que asigna al hombre de referencia un peso de 70 kg. En esta misma publicación 23 de ***ICRP***, el peso de los contenidos de los órganos de tracto gastrointestinal es de 1005 gramos (250 del estómago, 400 del intestino delgado y 355 del intestino grueso) mientras que el peso del contenido de la vesícula biliar es de 62 gramos, en total, la suma de estos contenidos es de 1067 gramos, por tanto, se tiene que:

$$\boldsymbol{SEE^{H}(OB \leftarrow TC) = \frac{9,1.10^{-16}\, J/tn}{68,933\, kg} = 1,32.10^{-17}\, Sv/tn}$$

Cálculo de la dosis equivalente y de la dosis efectiva para el Tritio.

Para incorporaciones de Tritio la ***dosis equivalente*** a cada órgano blanco del hombre adulto es igual para todo ellos y se obtiene multiplicando el número de transformaciones nucleares $\boldsymbol{U_s}$ por el valor de $\boldsymbol{SEE^{H}(OB \leftarrow TC)}$. Este valor así obtenido de la dosis equivalente puede tomarse también como valor de la ***dosis efectiva*** para el individuo. En los casos en los que se utilice la concentración de Tritio en orina para estimar las dosis, la dosis que así se estime es relativamente independiente del peso de la persona dado que su volumen total de agua (del que se obtiene las $\boldsymbol{U_s}$) es proporcional a su peso y puesto que $\boldsymbol{SEE^{H}(OB \leftarrow TC)}$ es inversamente proporcional al peso, el producto de estas dos cantidades que es el valor de la dosis equivalente y efectiva, es relativamente insensible al peso del individuo.

13. Ejemplos de casos prácticos

Los ejemplos siguientes se han obtenido del curso avanzado de *EURADOS/OIEA* llevado a cabo en Praga del 2 al 6 de febrero de 2009 y han sido evaluados utilizando valores numéricos de los coeficientes de dosis y otras magnitudes de bioensayo obtenidos de las ***Publicaciones 68*** y ***78*** de *ICRP*. EL propósito de estos ejemplos es demostrar la aplicación de la ***Guía IDEAS*** para la evaluación de dosis. Los coeficientes de dosis y otras magnitudes bioensayo están siendo revisados por *ICRP* y los nuevos valores se publicarán con la serie de documentos ***OIR*** (***Occupational Intakes of Radionuclides***). Los organismos reguladores nacionales indicarán la fuente para los valores numéricos que deberán ser utilizados en las evaluaciones de dosis internas

13.1 Inhalación crónica de I-125 (Caso ELP1)

Descripción del área de trabajo

Planta de producción de preparados para radioinmunoanálisis

Características del trabajo

Producción de preparados para radioinmunoanálisis

Motivo de la vigilancia; suceso iniciador

Vigilancia rutinaria. Se vigila al personal cada tres meses aproximadamente mediante un contaje de tiroides.

Acciones emprendidas

Una persona inicia su trabajo con material radiactivo (I-125) el 4 de mayo de 2006. A lo largo de su trabajo no se registraron sucesos anómalos.

Información adicional

Forma química

Yodo en forma gaseosa.

Características físicas, tamaño de partícula

Vapores. Se hizo una vigilancia de aire pero solo para muestrear partículas. Los resultados fueron normales por debajo del límite de detección.

Frotis nasales, moco bronquial o similar

No

Intervenciones de otro tipo (agentes quelantes, bloqueadores, etc.)

No

Datos de vigilancias de todo el cuerpo

Datos de vigilancias de otros órganos

Medidas de actividad en Tiroides

Fecha	Actividad de I-125 en Tiroides (Bq)	Incertidumbres debidas a la estadística de contaje 1 σ (Bq)
31 de julio de 2006	4410	± 290
4 de noviembre de 2006	830	± 70
9 de febrero de 2007	7510	± 540
9 de mayo de 2007	5780	± 380
2 de agosto de 2007	1900	± 150

Datos de vigilancia de excretas

Medidas de actividad en orina.

Ninguna

Medidas de actividad en heces.

Ninguna

Datos personales

Sexo

Masculino

Edad

32 años

Peso

67 kg

Otros comentarios relevantes para la estimación de la incorporación y de la dosis

Estimar la incorporación y la dosis efectiva comprometida E(50) realizando una evaluación utilizando únicamente hojas de cálculo para los 5 periodos de exposición del trabajador.

Más aun, evaluar el caso con el uso de al menos uno de los tres software disponibles

Completar la tabla siguiente con la mejor evaluación obtenida:

	P E R I O D O S				
	Del 4 de mayo de 2006 al 31 de julio de 2006	**Del 31 de julio de 2006 al 4 de noviembre de 2006**	**Del 4 de noviembre de 2006 al 9 de febrero de 2007**	**Del 9 de febrero de 2007 al 9 de mayo de 2007**	**Del 9 de mayo de 2007 al 2 de agosto de 2007**
Contribución de incorporaciones anteriores. P (Bq)					
$P*SF^2$ (Bq)					
P/SF^2 (Bq)					
Fecha de la incorporación (si la hubo) (dd/mm/aaaa)					
Incorporación (Bq)					
E(50) (mSv)					
Paso final de la Guía IDEAS					

Solución de referencia del Caso ELP1

El caso se evalúa siguiendo la ***Guía IDEAS***. Las siguientes tablas presentan para cada uno de los diagramas de flujo la descripción de los diferentes apartados y orientaciones relacionadas con la aplicación de la guía a este ejercicio ELP1. Las tablas proporcionan la numeración de cada paso, comentarios y razones de porqué se utiliza ese paso y las acciones llevadas a cabo durante la evaluación. La descripción es responsabilidad del revisor de la evaluación.

Evaluación de la primera medida de vigilancia

Paso	**Explicación**	***Comentarios***	**Acción siguiente**
1.1	Identificar los valores medidos	*La persona empieza su trabajo con material radiactivo (I-125) el 4 de mayo de 2006. La primera medida de I-125 en tiroides se lleva a cabo el 31 de julio de 2006. La actividad medida es de **4410 Bq** con una incertidumbre de **290 Bq***	Ir al paso 1.2
1.2	¿***M < M_c***?	*El valor de **M_c** para el tiroides se ha determinado sobre la base de un coeficiente dosis de **1,4E-08 Sv/Bq** y con la función de retención en el tiroides para **90** días, con lo que se obtiene un **M_C** de **203 Bq**, por tanto **M > M_c***	Ir al paso 1.3
1.3	Exposición por encima del nivel 0	*Se necesita evaluación de dosis*	Ir a la Etapa 2, Paso 2.0
2.0	Entender el caso	*Utilizando una función de retención **m(t)** de yodo en tiroides para vapores para el punto medio del primer intervalo de vigilancia (**88 días**) y el coeficiente de dosis indicado en 1.2, se obtiene una incorporación de **40,000 Bq** y una dosis efectiva comprometida E(50) de **0,52 mSv**.*	Ir al paso 2.1
2.1	Evaluación de la incertidumbre de ***M***	*De la **tabla 4.8** se obtiene un valor de **1,25** para el factor de dispersión **SF_B** para el I-125. La incertidumbre de la medida proporciona un **SF_A** de **1,07 = exp(290/4401)**, por lo que la incertidumbre total será de **SF = 1,26***	Ir al paso 2.2
2.2	Contribución de incorporaciones anteriores	*No hay contribución de incorporaciones anteriores, por tanto **P = 0***	Ir al paso 2.3

2.3	¿Es ***M> P*SF²***?	*Sí puesto que **P = 0***	Ir al paso 2.3.1.
2.3.1	Nueva incorporación?	*Hay evidencia de una nueva incorporación significativa, Puesto que **P = 0**; **N = M***	Ir a la etapa 3 - paso 3.1
3.1	¿Es una vigilancia rutinaria?	*Sí*	Ir al paso 3.2
3.2	Identificar vía de incorporación	*Inhalación*	Ir al paso 3.3
3.3	Asignar valores por defecto a los parámetros	*Vapor, momento de la incorporación = punto medio del intervalo de vigilancia*	Ir al paso 3,4
3.4	Estimar incorporación y dosis	*Incorporación = **37373 Bq**, E(50) = **0,523 mSv***	Ir al paso 3.5.
3.5	¿Es dosis < 1 mSv?	*Sí*	Ir al paso 3.5.1
3.5.1	Registrar la incorporación y la dosis	***Fecha de incorporación: 17/06/2006; Inhalación de vapores de I-125, Incorporación = 37373 Bq, E(50) = 0,523 mSv***	Fin del 1º periodo de vigilancia

Evaluación de la segunda medida de vigilancia

Paso	**Explicación**	***Comentarios***	**Acción siguiente**
1.1	Identificar los valores medidos	*La segunda medida de I-125 en tiroides se llevó a cabo el 4 de noviembre de 2006. La actividad medida es de **830 Bq** con una incertidumbre de **70 Bq***	Ir al paso 1.2
1.2	¿***M < M_c***?	***M_c** es igual a **207 Bq**; por tanto **M > M_c***	Ir al paso 1.3
1.3	Exposición por encima del nivel 0	*Se necesita evaluación de dosis*	Ir a la Etapa 2, Paso 2.0
2.0	Entender el caso	*Utilizando una función de retención **m(t)** de yodo en tiroides para vapores para el punto medio del intervalo de vigilancia (**96 días**) y el coeficiente de dosis indicado en 1.2, se obtiene una incorporación de **8 kBq** y una dosis efectiva comprometida E(50) de **0,11 mSv**.*	Ir al paso 2.1
2.1	Evaluación de la incertidumbre de ***M***	*De la **tabla 4.8** se obtiene un valor de **1,25** para el factor de dispersión **SF_B** para el I-125. La incertidumbre de la medida proporciona un **SF_A** de **1,09 = exp(290/4401)**, por lo que la incertidumbre total será de **SF = 1,27***	Ir al paso 2.2
2.2	Contribución de incorporaciones anteriores	*La contribución de la incorporación previa es igual a **792 Bq**. El valor de **P*SF²** es por tanto de = **1277 Bq***	Ir al paso 2.3
2.3	¿Es ***M> P*SF²***?	*No*	Ir al paso 2.4
2.4	¿***P/SF²<M< P*SF²***?	*EL valor de **P/SF²** = **492 Bq**, por tanto se cumple la condición*	Ir al paso 2.4.1
2.4.1	No existe una nueva incorporación	*No existe una nueva incorporación, por tanto **I = 0 Bq** y **E(50) = 0 mSv***	Fin del 2º periodo de vigilancia

Evaluación de la tercera medida de vigilancia

Paso	**Explicación**	***Comentarios***	**Acción siguiente**
1.1	Identificar los valores medidos	*La tercera medida de I-125 en tiroides se llevó a cabo el 9 de febrero de 2007. La actividad medida es de **7510 Bq** con una incertidumbre de **540 Bq***	Ir al paso 1.2
1.2	¿***M < M_c***?	*El valor de **M_c** para el tiroides se ha determinado sobre la base de un coeficiente dosis de **1,4E-08 Sv/Bq** y con la función de retención en el tiroides para **97** días y es igual a **209 Bq** por tanto **M > M_c***	Ir al paso 1.3
1.3	Exposición por encima del nivel 0	*Se necesita evaluación de dosis*	Ir a la Etapa 2, Paso 2.0

2.0	Entender el caso	*Utilizando una función de retención **m(t)** de yodo en tiroides para vapores para el punto medio del intervalo de vigilancia (**97 días**) y el coeficiente de dosis indicado en 1.2, se obtiene una incorporación de **70 kBq** y una dosis efectiva comprometida E(50) de **0,97 mSv**.*	Ir al paso 2.1
2.1	Evaluación de la incertidumbre de ***M***	*De la **tabla 4.8** se obtiene un valor de **1,25** para el factor de dispersión SF_B para el I-125. La incertidumbre de la medida proporciona un SF_A de **1,07**, por lo que la incertidumbre total será de **SF = 1,26***	Ir al paso 2.2
2.2	Contribución de incorporaciones anteriores	*La contribución de la incorporación previa es igual a **140 Bq**. El valor de $P*SF^2$ es por tanto de = **224 Bq***	Ir al paso 2.3
2.3	¿Es $M > P*SF^2$?	*Sí*	Ir al paso 2.3.1
2.3.1	Nueva incorporación?	*Hay evidencia de una nueva incorporación, **N = 7370***	Ir a la etapa 3 - paso 3.1
3.1	¿Es una vigilancia rutinaria?	*Sí*	Ir al paso 3.3
3.2	Identificar vía de incorporación	*Inhalación*	Ir al paso 2.3
3.3	Asignar valores por defecto a los parámetros	*Vapor, momento de la incorporación = punto medio del intervalo de vigilancia*	Ir al paso 3,4
3.4	Estimar incorporación y dosis	*Incorporación = **68239 Bq**, E(50) = **0,955 mSv***	Ir al paso 3.5.
3.5	¿Dosis < 1 mSv?	*Sí*	Ir al paso 3.5.1
3.5.1	Registrar la incorporación y la dosis	***Fecha de incorporación: 22/12/2006; Inhalación de vapores de I-125, Incorporación = 68239 Bq, E(50) = 0,955 mSv***	Fin del 3º periodo de vigilancia

Evaluación de la cuarta medida de vigilancia

Paso	**Explicación**	***Comentarios***	**Acción siguiente**
1.1	Identificar los valores medidos	*La cuarta medida de I-125 en tiroides se llevó a cabo el 9 de mayo de 2007. La actividad medida es de **5780 Bq** con una incertidumbre de **380 Bq***	Ir al paso 1.2
1.2	¿$M < M_c$?	*El valor de M_c para el tiroides se ha determinado sobre la base de un coeficiente dosis de **1,4E-08 Sv/Bq** y con la función de retención en el tiroides para **89** días y es igual a **202 Bq**; por tanto $M > M_c$*	Ir al paso 1.3
1.3	Exposición por encima del nivel 0	*Se necesita evaluación de dosis*	Ir a la Etapa 2, Paso 2.0
2.0	Entender el caso	*Utilizando una función de retención **m(t)** de yodo en tiroides para vapores para el punto medio del intervalo de vigilancia (**89 días**) y el coeficiente de dosis indicado en 1.2, se obtiene una incorporación de **50 kBq** y una dosis efectiva comprometida E(50) de **0,70 mSv**.*	Ir al paso 2.1
2.1	Evaluación de la incertidumbre de ***M***	*De la **tabla 4.8** se obtiene un valor de **1,25** para el factor de dispersión SF_B para el I-125. La incertidumbre de la medida proporciona un SF_A de **1,07**, por lo que la incertidumbre total será de **SF = 1,26***	Ir al paso 2.2
2.2	Contribución de incorporaciones anteriores	*La contribución de ambas incorporaciones previas es igual a **1530 Bq**. El valor de $P*SF^2$ es por tanto de = **2436 Bq***	Ir al paso 2.3
2.3	¿Es $M > P*SF^2$?	*No*	Ir al paso 2.3.1
2.3.1	¿Nueva incorporación?	*Hay evidencia de una nueva incorporación, **N = 4250***	Ir a la etapa 3 - paso 3.1
3.1	¿Es una vigilancia rutinaria?	*Sí*	Ir al paso 3.2
3.2	Identificar vía de incorporación	*Inhalación*	Ir al paso 3.3

3.3	Asignar valores por defecto a los parámetros	*Vapor, momento de la incorporación = punto medio del intervalo de vigilancia*	Ir al paso 3.4
3.4	Estimar incorporación y dosis	*Incorporación =* ***36639 Bq****, E(50) =* ***0,513 mSv***	Ir al paso 3.5.
3.5	¿Es dosis < 1 mSv?	*Sí*	Ir al paso 3.5.1
3.5.1	Registrar la incorporación y la dosis	***Fecha de incorporación: 25/03/2007; Inhalación de vapores de I-125, Incorporación = 36639 Bq, E(50) = 0,513 mSv***	Fin del 4º periodo de vigilancia

Evaluación de la quinta medida de vigilancia

Paso	**Explicación**	***Comentarios***	**Acción siguiente**
1.1	Identificar los valores medidos	*La quinta medida de I-125 en tiroides se llevó a cabo el 2 de agosto de 2007. La actividad medida es de* ***1900 Bq*** *con una incertidumbre de* ***150 Bq***	Ir al paso 1.2
1.2	¿$M < M_c$?	M_c *es igual a* ***200 Bq*** *por tanto* $M > M_c$	Ir al paso 1.3
1.3	Exposición por encima del nivel 0	*Se necesita evaluación de dosis*	Ir a la Etapa 2, Paso 2.0
2.0	Entender el caso	*Utilizando una función de retención* ***m(t)*** *de yodo en tiroides para vapores para el punto medio del intervalo de vigilancia (****85 días****) y el correspondiente coeficiente de dosis indicado en 1.2, se obtiene una incorporación de* ***20 kBq*** *y una dosis efectiva comprometida E(50) de* ***0,22 mSv****.*	Ir al paso 2.1
2.1	Evaluación de la incertidumbre de ***M***	*De la* ***tabla 4.8*** *se obtiene un valor de* ***1,25*** *para el factor de dispersión* SF_B *para el I-125. La incertidumbre de la medida proporciona un* SF_A *de* ***1,08****, por lo que la incertidumbre total será de* ***SF = 1,27***	Ir al paso 2.2
2.2	Contribución de incorporaciones anteriores	*La contribución de las 3 incorporaciones previas es igual a* ***1261 Bq****. El valor de* $P*SF^2$ *es por tanto de =* ***2025 Bq***	Ir al paso 2.3
2.3	¿Es $M > P*SF^2$?	*No*	Ir al paso 2.4
2.4	¿$P/SF^2 < M < P*SF^2$?	*EL valor de* P/SF^2 = ***786 Bq****, por tanto se cumple la condición*	Ir al paso 2.4.1
2.4.1	No existe una nueva incorporación	*No existe una nueva incorporación, por tanto* ***I = 0 Bq*** *y* ***E(50) = 0 mSv***	Fin del 5º periodo de vigilancia

La tabla final con la evaluación de referencia es la siguiente

	PERIODOS				
	Del 4 de mayo de 2006 al 31 de julio de 2006	**Del 31 de julio de 2006 al 4 de noviembre de 2006**	**Del 4 de noviembre de 2006 al 9 de febrero de 2007**	**Del 9 de febrero de 2007 al 9 de mayo de 2007**	**Del 9 de mayo de 2007 al 2 de agosto de 2007**
Contribución de incorporaciones anteriores. P (Bq)	**0**	**792**	**140**	**1530**	**1261**
$P*SF^2$ (Bq)		**1277**	**224**	**2436**	**2025**
P/SF^2 (Bq)		**492**	**88**	**961**	**786**
Fecha de la incorporación (si la hubo) (dd/mm/aaaa)	**17/06/2006**		**22/12/2006**	**25/03/2007**	
Incorporación (Bq)	**37373**		**68329**	**36639**	
E(50) (mSv)	**0,523**		**0,955**	**0,513**	
Paso final de la Guía IDEAS	**3.5.1**	**2.4.1**	**3.5.1**	**2.5.1**	**2.4.1**

13.2 Inhalación única de Uranio enriquecido (Caso ELP2)

El suceso

Características del trabajo

Cambio de filtros del sistema de ventilación de una fundición en la que se manipula uranio enriquecido.

Motivo de la vigilancia; suceso iniciador

No se utilizaba protección respiratoria apropiada.

Acciones emprendidas

Se realizó una medida de tórax 3 horas después del incidente. Se estableció un programa de vigilancia con medidas en tórax y toma de muestras de orina.

Información adicional

Forma química

U_3O_8

Características físicas, tamaño de partícula

Aerosol

Frotis nasales, moco bronquial o similar

Ninguno

Intervenciones de otro tipo (agentes quelantes, bloqueadores, etc.)

No

Datos de vigilancias de todo el cuerpo

Medidas de actividad en pulmón

Momento de la medida tras la incorporación (d)	Actividad de U-235 en el pulmón (Bq)	Incertidumbres debidas a la estadística de contaje 1 σ (Bq)
0,125	43	± 7
7	29	± 6
18	26	± 6
30	27	± 6
60	22	± 5

Datos de vigilancia de excretas

Medidas de actividad en orina

Momento de la medida tras la incorporación (d)	Tasa diaria de excreción de U-235 (Bq/d)
2	1,2
9	0,26
16	0,37
30	0,17
58	0,13

Todas las muestras de orina viene afectadas por una incertidumbre debida a la estadística del contaje de ±10% (1σ)

Datos personales

Sexo

Masculino

Edad

35 años

Peso

70 kg

Otros comentarios relevantes para la estimación de la incorporación y de la dosis

Los datos de orina son medidas simuladas de 24 horas. Aunque también se midió por espectrometría α la actividad del U-234 y del U-238, estas medidas no han sido reportadas para este ejercicio. Sin embargo los datos eran consistentes con la presencia de Uranio enriquecido al 3,5% en peso. Supóngase la composición isotópica de la siguiente ***tabla C***.

Medidas previas de excreción urinaria indicaron que la excreción de uranio procedente de la dieta alimenticia (consumo de agua) era menor de 0,1 μg/d de uranio natural.

Estímese la incorporación de todos los isótopos de uranio y calcúlese la dosis efectiva comprometida E(50) procedente de cada radionucleido y su valor total realizando la evaluación utilizando únicamente hojas de cálculo. Completar las tablas A y B siguientes:

Tabla A: Hipótesis utilizadas en la evaluación

AMAD (μm)	
Tipo de absorción	
Valor de f_1	
Paso final de la Guía IDEAS	

Tabla B: Incorporaciones y dosis efectivas comprometidas evaluadas por la inhalación de uranio enriquecido

Isótopo	Actividad α		Incorporación (Bq)	Coeficiente de dosis e(50) (Sv/Bq)	E(50) (mSv)
	%	En relación al U-235			
U-238	14,78	4,28			
U-235	3,45	1,00			
U-234	81,77	23,70			
Total	100	---			

Tablas de apoyo

Tabla C: Composición isotópica del Uranio enriquecido al 3,5%

Isótopo	Composición isotópica (%)[a]	Actividad α (%)	Actividad α (Bq/g)[b]
U-238	96,471	14,78	1,2E+04
U-235	3,5	3,45	2,80E+03
U-234	0,02884	81,77	6,64E+04
Actividad total α (Bq/g)			8,12E+04
Relación de actividades α U-234/U-238			5,53
Relación de actividades α U-235/U-238			0,233

[a] **La composición isotópica está expresada en % en peso del total de los isótopos de Uranio**

[b] **La actividad α viene expresada en Bq por gramo.**

Tabla D: Composición isotópica del Uranio Natural

Isótopo	Composición isotópica (%)[a]	Actividad α (%)	Actividad α (Bq/g)[b]
U-238	99,2745	48,26	1,23E+04
U-235	0,72	2,25	5,76E+02
U-234	0,0055	49,49	1,27E+04
Actividad total α (Bq/g)			2,56E+04
Relación de actividades α U-234/U-238			1,03
Relación de actividades α U-235/U-238			0,047

[a] **La composición isotópica está expresada en % en peso del total de los isótopos de Uranio**

[b] **La actividad α viene expresada en Bq por gramo.**

Solución de referencia del Caso ELP2

El caso se evalúa siguiendo la ***Guía IDEAS***. Las siguientes tablas presentan para cada uno de los diagramas de flujo la descripción de los diferentes apartados y orientaciones relacionadas con la aplicación de la guía a este ejercicio ELP2. Las tablas proporcionan la numeración de cada paso, comentarios y razones de porqué se utiliza ese paso y las acciones llevadas a cabo durante la evaluación. La descripción es responsabilidad del revisor de la evaluación

Evaluación de la etapa 2

Paso	Explicación	*Comentarios*	Acción siguiente
1.1	Determinar los valores medidos	*Se considera la primera medida pulmonar realizada 0,125 días después de la incorporación (**43 ± 7 Bq**)*	Ir al paso 1.2
1.2	¿***M < M_c***?	*Aun considerando el mayor valor de los de la tabla 3.9 (0,3 Bq), para U-235 en pulmones, el valor medido de 43 Bq es mayor que **M_C** por tanto **M > M_c***	Ir al paso 1.3
1.3	Exposición por encima del nivel 0	*Se necesita evaluación de dosis*	Ir a la Etapa 2, Paso 2.0
2.0	Entender el caso	*En base al valor medido **m(t)** para el U-235 y el tipo de absorción escogido, **tipo S** (puesto que el compuesto conocido es U_3O_8), se puede estimar una excreción urinaria de **0,074 Bq** al cabo de 0,1 días y con las relaciones isotópicas con los otros isótopos del Uranio, se pueden aventurar de forma preliminar las siguientes incorporaciones y dosis efectivas comprometidas E(50)* ***U-235 – Incorporación = 600 Bq, E(50) = 3,5 mSv*** ***U-234 – Incorporación = 10000 Bq, E(50) = 94 mSv*** ***U-238 – Incorporación = 2500 Bq, E(50) = 14 mSv*** *El valor total evaluado de E(50) es de 111 mSv, muy superior al límite anual de dosis de **20 mSv** para trabajadores expuestos*	Ir al paso 2.1
2.1	Evaluación de la incertidumbre de ***M***	*De la **tabla 4.8** se obtiene un valor de **1,15** para el factor de dispersión **SF_B** para medidas de U-235 en pulmones. La incertidumbre de la medida proporciona un **SF_A** de **1,18** por lo que la incertidumbre total será de **SF = 1,24***	Ir al paso 2.2
2.2	Contribución de incorporaciones anteriores	*No hay contribución de incorporaciones anteriores, por tanto **P = 0***	Ir al paso 2.3
2.3	¿Es ***M> P*SF^2***?	*Si puesto que **P = 0***	Ir al paso 2.3.1.
2.3.1	¿Nueva incorporación?	*Hay evidencia de una nueva incorporación significativa, Puesto que **P = 0; N = M***	Ir a la etapa 3

Evaluación de las etapas 3 y 4

Paso	Explicación	*Comentarios*	Acción siguiente
3.1	¿Es una vigilancia rutinaria?	*No*	Ir a la etapa 4
4.1	¿Inhalación pura?	*En la descripción del caso se indica que no se utilizó protección respiratoria por lo que se considera únicamente al inhalación*	Ir al paso 4.1.1.y a la etapa 5

Evaluación de la etapa 5

Paso	Explicación	*Comentarios*	Acción siguiente
5.1	Identificación de todas las medidas obtenidas	*Se dispone de 5 medidas en tórax de la actividad en pulmones abarcando un espacio temporal desde 3 horas hasta 60 días tras la incorporación y se dispone también de 5 medidas de orina desde los 2 hasta los 58 días posteriores al suceso, pero únicamente para el radionucleido U-235.* *Para todas las medidas se puede calcular el valor correcto de su **SF** utilizando los datos de incertidumbre de las medidas en tórax y orina. Para las medidas de la actividad en pulmones, **SF** varía entre **1,24** y **1,31**. Para las medidas en orina el valor de **SF** de **1,62** es igual para todas.* *Por los datos obtenidos se puede valorar que no hay datos fuera de rangopresentes.* *La descripción del caso aporta relaciones isotópicas en masa y en actividad y se supone que estas relaciones isotópicas no tienen incertidumbres.*	Ir al paso 5.2

5.2	Evaluación de contribuciones de anteriores incorporaciones	*No se evalúan incorporaciones previas dado que al final de la descripción del caso se indica que "las medidas previas de excreción urinaria indicaron que la excreción de uranio procedente de la dieta alimenticia era menor de 0,1 μg/d de uranio natural", por lo tanto no ha habido incorporaciones previas.*	Ir al paso 5.3
5.3	Asignar valores por defecto a los parámetros	*Se supone que ha ocurrido una incorporación única, tipo de absorción S según ICRP-78 para compuestos de U_3O_8, AMAD =* ***5 μm****, f_1 =* ***0,002****.*	Ir al paso 5.4
5.4	¿Se conoce el momento de la incorporación?	*Sí*	Ir al paso 5.5
5.5	Calcular la dosis con los valores por defecto de los parámetros	*La mejor estimación de la incorporación se calcula empleando la siguiente ecuación donde* ***C*** *se refiere a las medidas en pulmones y* ***U*** *a las de orina:* $$\boldsymbol{ln(I)} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} \frac{\boldsymbol{ln}\left(\frac{\boldsymbol{N_{Ci}}}{\boldsymbol{m_C(t_i)}}\right)}{(\boldsymbol{ln}\,(\boldsymbol{SF_{Ci}}))^2} + \sum_{j=1}^{n_U} \frac{\boldsymbol{ln}\left(\frac{\boldsymbol{N_{Uj}}}{\boldsymbol{m_u(t_j)}}\right)}{(\boldsymbol{ln}\,(\boldsymbol{SF_U}))^2}}{\sum_{i=1}^{n_c} \frac{\boldsymbol{1}}{(\boldsymbol{ln}\,(\boldsymbol{SF_{Ci}}))^2} + \sum_{j=1}^{n_U} \frac{\boldsymbol{1}}{(\boldsymbol{ln}\,(\boldsymbol{SF_U}))^2}}$$ *Todos los* ***SF*** *para las medidas de orina son iguales.* *Las incorporaciones y dosis evaluadas han sido:* *U-235 – Incorporación =* ***1184 Bq****; E(50) =* ***7,2 mSv*** *U-234 – Incorporación =* ***28069 Bq****; E(50) =* ***190,9 mSv*** *U-238 – Incorporación =* ***5073 Bq****; E(50) =* ***28,9 mSv*** *En total se ha evaluado una dosis de* ***227 mSv****.*	Ir al paso 5.6
5.6	¿Es la dosis < 1 mSv?	*No y no solo la dosis total sino también la de cada componente individual de los isótopos de Uranio.*	Ir a la etapa 5B
5.7	¿Se dispone de suficientes datos relevantes?	*De la* ***tabla 6.2*** *se deduce que para un periodo de 30 días se debe disponer al menos de 2 medidas de orina + 2 de heces + 2 de pulmones.* *Aquí se dispone de 5 medidas en pulmones y otras 5 de orina en un periodo de 60 días, por lo tanto se puede concluir que se dispone de suficientes datos relevantes.*	Ir al paso 5.8
5.8	¿Se conoce el momento de la incorporación?	*Sí*	Ir al paso 5.9
5.9	¿Se dispone de datos tempranos de medidas en pulmones y heces?	*Solo se dispone de datos iniciales o tempranos de medidas en tórax pero no de heces, luego al respuesta es no*	Ir al paso 5.11

5.11. y 5.11.1	Evaluar la dosis ajustando el tipo de absorción	*La primera evaluación de la incorporación y dosis se hizo con un tipo de absorción por defecto de **S**. El valor observado de χ^2 ha sido evaluado con la siguiente ecuación:* $$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^{n_C}\left(\frac{\ln(N_{Ci}) - \ln[I.m_C(t_i)]}{\ln(SF_{Ci})}\right)^2 + \sum_{j=1}^{n_U}\left(\frac{\ln(N_{Uj}) - \ln(I.m_U(t_j))}{\ln(SF_U)}\right)^2$$ *Su valor es de **247** con **9 grados de libertad** lo que representa un **p-valor** de **4E-46** (<0,05) lo que descarta totalmente el ajuste realizado.* *La segunda evaluación se ha hecho suponiendo un tipo **M** de absorción utilizando la misma ecuación del paso 5.5. En este caso el valor de la función de retención para la medida en pulmones a los **0,125** días se ha interpolado linealmente ente los valores tabulados de MONDAL/MONDES (Ishigure 2003) PC respectivamente para 0,1 y 0,2 días. Para 0,125 días el valor empleado ha sido de **0,065875**.* *Con tipo de absorción tipo **M** (con un f_1= **0,02**) los resultados de la mejor estimación de la incorporación han sido:* *Las incorporaciones y dosis evaluadas han sido:* *U-235 – Incorporación = **667 Bq**; E(50) = **1,2 mSv*** *U-234 – Incorporación = **15808 Bq**; E(50) = **33,2 mSv*** *U-238 – Incorporación = **2857 Bq**; E(50) = **4,6 mSv*** *En total se ha evaluado una dosis de **39 mSv**.* *Ahora el valor observado de χ^2 es de **3,3** con 9 grados de libertad lo que determina un **p-valor** de **0,95**. Se cumple el segundo criterio: no se ha realizado ninguna sobreestimación o subestimación con los datos disponibles.* *El ajuste se acepta.* *Aunque ICRP-68 recomienda un tipo de absorción tipo **S** para el U_3O_8, la Publicación 71 de ICRP (ICRP 1995c) en el párrafo 249 de la página 298 hace notar que se han observados considerables comportamientos del U_3O_8 tanto de tipo S como M. En este caso, los datos de orina indican material del tipo **M**.*	Ir al paso 5.11.2
5.11.2	¿Es la dosis < 6 mSv?	*Para el radionucleido investigado que es el U-235, la respuesta es **Sí**.*	Ir al paso 5.11.3
5.11.3	Registrar la dosis con todos los parámetros	*Los utilizados en el paso 5.11 para el tipo M.*	FIN

En las dos figuras siguientes se observan respectivamente los valores medidos de la actividad en pulmones y en orina así como las curvas de ajuste de esos datos para las tipos ***S*** y ***M***.

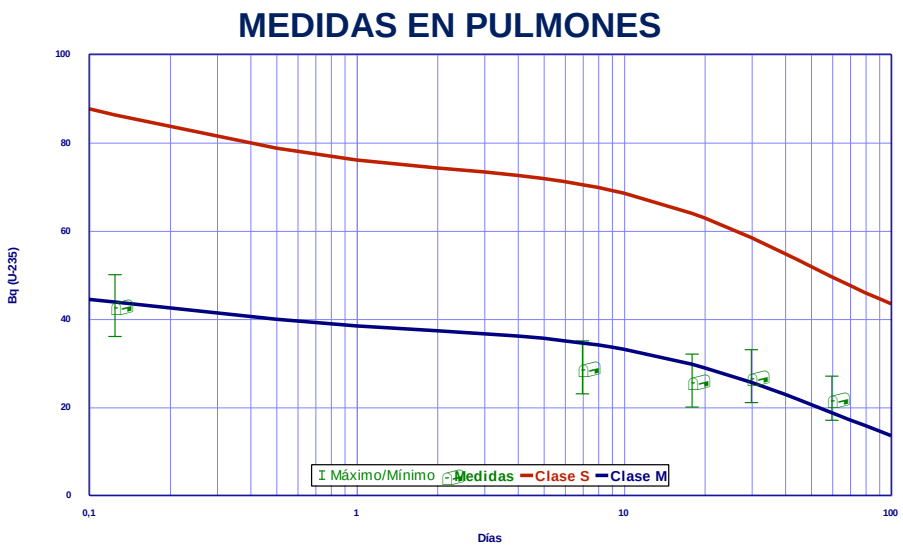


Figura 6: Medidas en pulmones y curvas ajustadas para los tipos de absorción M y S

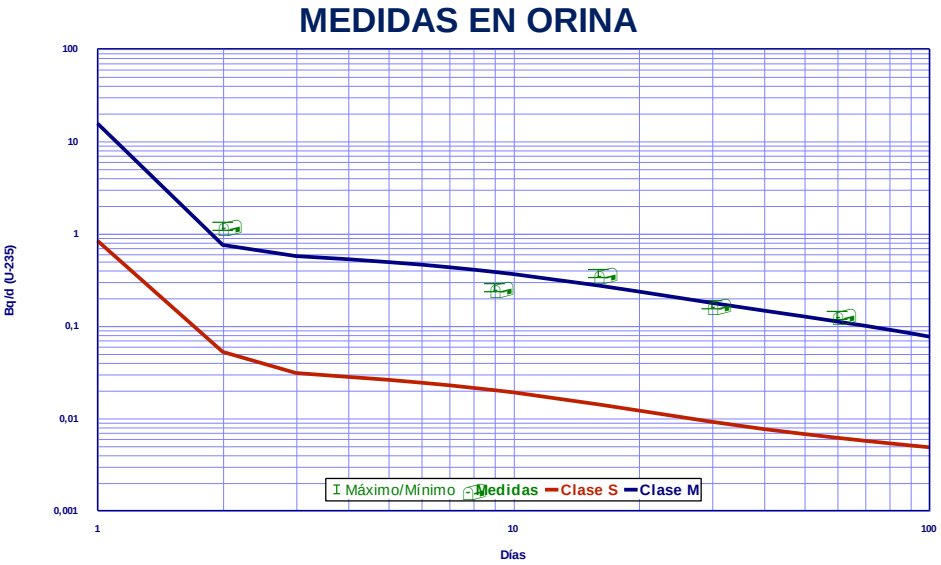


Figura 7: Medidas de excreción diaria en orina y curvas ajustadas para los tipos de absorción M y S

Las tablas finales de la evaluación de referencia son las siguientes:

Supuestos utilizados en la evaluación	
AMAD (μm)	5
Tipo de Absorción	M
f_1	0,02
Paso final de la Guía IDEAS	5.11.3

Incorporaciones y dosis efectivas comprometidas evaluadas para la inhalación de Uranio enriquecido					
Isótopo	Actividad α		Incorporación (Bq)	Coeficiente de dosis e(50) (Sv/Bq)	E(50) (mSv)
	%	En relación al U-235			
U-238	14,78	4,28	2857	1,6E-06	4,6
U-235	3,45	1,00	667	1,8E-07	1,2
U-234	81,77	23,70	15808	2,1E-06	33,2
Total	100	---	---		39

13.3 Inhalación única de Am-241 (Caso ELP3)

El suceso

Descripción del área de trabajo

Laboratorio.

Características del trabajo

Examen rutinario de fuentes de Am-241 en desuso

Motivo de la vigilancia; suceso iniciador

Al examinar una fuente antigua de 370 MBq de Am-241, la persona descubrió contaminación desprendible en las inmediaciones del lugar de trabajo. Medidas adicionales revelaron también contaminación desprendible de Am-241 en todo el área general de trabajo.

Acciones emprendidas

Se tomó un frotis nasal y se realizó una medida de tórax 3 horas después del incidente. Se estableció un programa de vigilancia con medidas en pulmones y toma de muestras de orina y de heces.

Información adicional

Forma química

Se cree que el Americio estaba en forma de óxido

Características físicas, tamaño de partícula

Aerosol

Frotis nasales, moco bronquial o similar

No

Intervenciones de otro tipo (agentes quelantes, bloqueadores, etc.)

No

Datos de vigilancias de todo el cuerpo

Medidas de actividad en torax (pulmones)

Momento de la medida tras la incorporación (d)	Actividad de Am-241 en tórax (Bq)
0,125	73
3	62
10	52
30	47
60	49
100	23
180	28

Datos de vigilancia de excretas

Medidas de actividad en orina

Momento de la medida tras la incorporación (d)	Tasa diaria de excreción urinaria (Bq/d)
2	8,7E-03
9	4,0E-03
15	5,0E-03
25	3,0E-03
40	6,6E-03
60	1,2E-03

Medidas de actividad en heces

Momento de la medida tras la incorporación (d)	Tasa diaria de excreción en heces (Bq/d)
1	3,1E+01
2	9,1E+01
3	2,5E+00
9	1,1E+00
15	3,4E-01
25	1,1E+00
60	9,8E-02

Datos personales

Sexo

Masculino

Edad

35 años

Peso

70 kg

Otros comentarios relevantes para la estimación de la incorporación y de la dosis

Los datos de orina son medidas simuladas de 24 horas.

En el lugar de trabajo solo se maneja un único tipo de material (no hay posibilidad de mezclas de compuestos de diferente composición química).

Estímese la incorporación y la dosis efectiva comprometida E(50) utilizando IMBA profesional o AIDE.

Considerar la posibilidad de variar los parámetros específicos del material (p.e. AMAD, y los parámetros de absorción f_r y s_s del modelo HTRM) para obtener un buen ajuste de los datos.

Proporcione los resultados finales completando la siguiente tabla:

Magnitud	**Valor**
AMAD efectivo (μm)	
Parámetros específicos del modelo pulmonar HRTM	
- Fracción de disolución rápida, f_r	
- Tasa de disolución rápida s_r (d^{-1})	
- Tasa de disolución lenta s_s (d^{-1})	
f_1 (fracción absorbida desde el tracto gastrointestinal)	
Incorporación (Bq)	
Dosis efectiva comprometida (mSv)	
Paso final de la Guía IDEAS	
Software usado	

Solución de referencia del Caso ELP3

El caso se evalúa siguiendo la ***Guía IDEAS***. Las siguientes tablas presentan para cada uno de los diagramas de flujo la descripción de los diferentes apartados y orientaciones relacionadas con la aplicación de la Guía a este ejercicio ELP3. Las tablas proporcionan la numeración de cada paso, comentarios y razones de por qué se utiliza ese paso y las acciones llevadas a cabo durante la evaluación.

La evaluación que sigue ha sido llevada a cabo con IMBA profesional, aunque también se hubiera podido hacer con AIDE

Evaluación de la etapa 1 del caso ELP3

Paso	**Explicación**	***Comentarios***	**Acción siguiente**
1.1	Identificar los valores medidos	*Se considera la primera medida en pulmón realizada 0,125 días después de la incorporación con un resultado de **73 Bq*** de Am-241	Ir al paso 1.2
1.2	¿$M < M_c$?	*El valor de M_c para medida en pulmones para un intervalo de vigilancia de 360 días es de 0,044 Bq, por tanto $M > M_c$*	Ir al paso 1.3
1.3	Exposición por encima del nivel 0	*Se necesita evaluación de dosis*	Ir a la Etapa 2, Paso 2.0

Evaluación de la etapa 2 del caso ELP3

Paso	**Explicación**	***Comentarios***	**Acción siguiente**
2.0	Entender el caso	*Cálculo manual: para 3 días la medida en pulmones es **M = 62 Bq**.* *ICRP-78 indica una función de retención para pulmones de **0,055** de Am-241 (**AMAD** de **5 μm**, **tipo M**, y vigilancia especial a los **3 días**).* *Por tanto la incorporación podría ser de: 62/0,055 = **1100 Bq**.* *El coeficiente de dosis e(50) = **2,7E-05** Sv/Bq de lo que se deduce una dosis efectiva de **30 mSv**.* *El evaluador también deberá generar la gráfica con los datos.*	Ir al paso 2.1
2.1	Evaluación de la incertidumbre de ***M***	*Pulmones: se supone un **SF = 1,4** según la tabla 4.8 de la Guía para medidas directas de Am-241 que es un emisor gamma de una energía aproximada de 60 keV*	Ir al paso 2.2
2.2	Contribución de incorporaciones anteriores	*No hay contribución de incorporaciones anteriores, por tanto **P = 0***	Ir al paso 2.3
2.3	¿Es $M > P*SF^2$?	*Sí puesto que **P = 0***	Ir al paso 2.3.1.
2.3.1	¿Nueva incorporación?	*Hay evidencia de una nueva incorporación significativa, Puesto que **P = 0**; **N = M***	Ir a la etapa 3

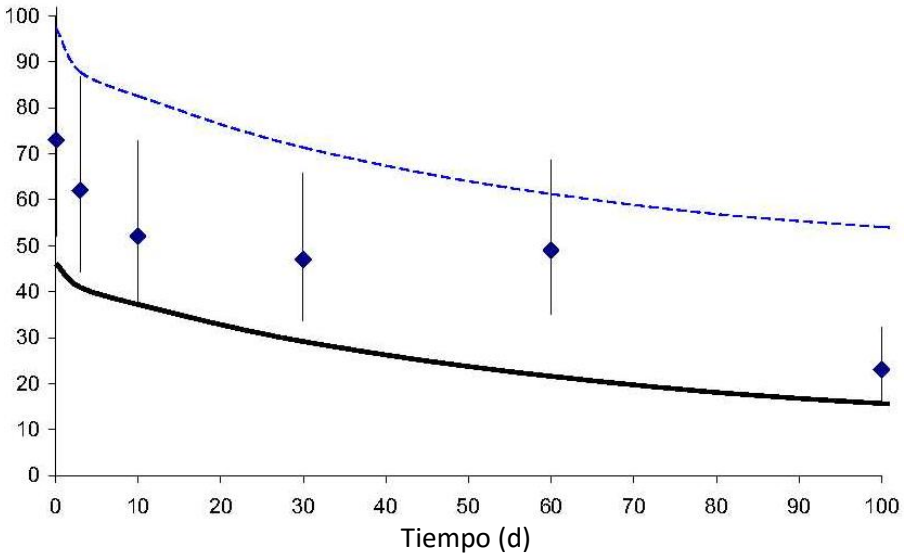
Evaluación de las etapas 3 y 4

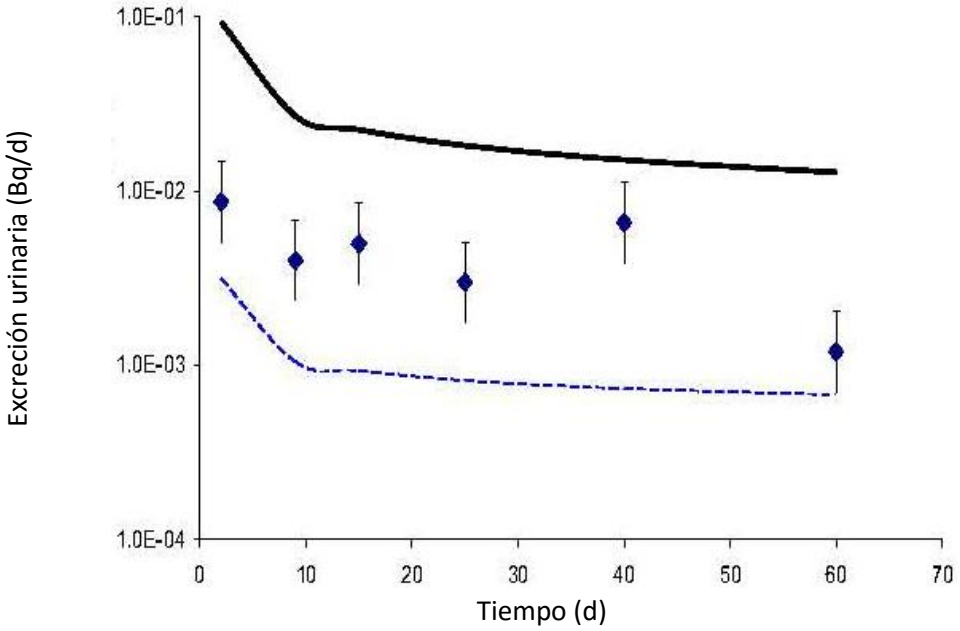
Paso	Explicación	*Comentarios*	Acción siguiente
3.1	¿Es una vigilancia rutinaria?	*No*	Ir a la etapa 4
4.1	¿Inhalación pura?	*El valor positivo del frotis nasal junto con las medidas de tórax indica inhalación. Por tanto se asume inhalación pura*	Ir al paso 4.4.1.y a la etapa 5

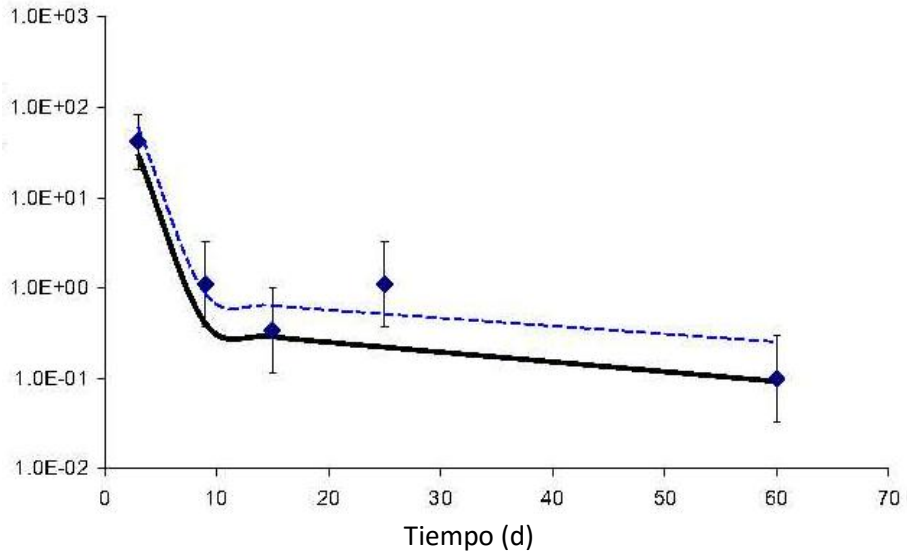
Evaluación de las etapas 5A y 5B del caso ELP3

Paso	Explicación	*Comentarios*	Acción siguiente
5.1	Identificación de todas las medidas obtenidas	*Se utilizan todas las medidas disponibles. Sin embargo, tal y como se indica en la sección **4.1**, para los datos tempranos de excreción fecal se considera la excreción acumulada en los **3** primeros días. La excreción fecal en los 3 primeros días es de **31 + 9 + 2,5 = 124,5 Bq**. Por tanto en vez de utilizar los tres primeros datos de excreción fecal, se va a utilizar uno solo de **124,5/3 = 41,5 Bq/d** para un periodo de recolección de 3 días. El valor correspondiente de **SF** es de **2,0** para una excreción fecal de **72 horas** (tabla 21).* ***Pulmones**: Se supone un **SF = 1,4** según la tabla 20 para medidas directas de Am-241, emisor gamma de 60 keV.* ***Orina**: **SF_B = 1,6** (tabla 21). Los valores de la excreción urinaria oscilan entre **1,2** y **8,7 mBq/d** y por tanto sus correspondientes incertidumbres **Tipo A** varían entre un **12%** y un **25%** (Ver figura 9 del informe **OMNINEX** – Etherington 2004, Hurtgen 2003). Combinando las incertidumbres de Tipo A y B se obtienen unos SF generales que oscilan entre 1,62 y 1,7. Por simplicidad se supone un **SF = 1,7** para todas las medidas de orina.* ***Heces – Muestras de 24 horas**: **SF_B = 3** (tabla 21). Los valores de la excreción fecal oscilan entre **0,1 Bq** y **90 Bq** y por tanto sus correspondientes incertidumbres **Tipo A** son menores del **10%** (Ver figura 9 del informe **OMNINEX** – Etherington 2004, Hurtgen 2003). Como las incertidumbres Tipo A son menores que las del Tipo B, se supone un **SF = 3** para todas las medidas de heces de 24 horas.* *La representación gráfica de los datos indica que no parece haber valores fuera de rango ("outliers")*	Ir al paso 5.2
5.2	Evaluación de contribuciones de anteriores incorporaciones	*No hay incorporaciones previas.*	Ir al paso 5.3
5.3	Asignar valores por defecto a los parámetros	*Se supone incorporación única, tipo de absorción **M**, AMAD = **5 μm***	Ir al paso 5.4
5.4	¿Se conoce el momento de la incorporación?	*Sí*	Ir al paso 5.5
5.5	Calcular la dosis con los valores por defecto de los parámetros	*La incorporación se ha estimado ajustando simultáneamente los datos de las medidas en pulmones, orina y heces con las predicciones del modelo utilizando el código IMBA Professional™ PC. El método de ajuste ha sido el de la máxima probabilidad que es el recomendado en la guía.* *Los resultados son: **Incorporación = 684 Bq, E(50) = 18,5 mSv*** *El ajuste de los datos es malo*	Ir al paso 5.6

5.6	¿Es la dosis < 1 mSv?	*No*	Ir a la etapa 5B
5.7	¿Se dispone de suficientes datos relevantes?	*De la tabla 6.2 se deduce que para dosis superiores a 1 mSv e inferiores a 6 mSv y para un periodo de 30 días se debe disponer al menos de 2 medidas en pulmones, 2 de orina y 2 de heces.* *Aquí se dispone de 4 medidas en pulmones para un periodo de 30 días, 6 de heces y otras 4 de orina para ese mismo periodo en un periodo, tanto se puede concluir que se dispone de suficientes datos relevantes.*	Ir al paso 5.8
5.8	¿Se conoce el momento de la incorporación?	*Sí*	Ir al paso 5.9
5.9	¿Se dispone de datos tempranos de medidas en pulmones y heces?	*Sí*	Ir al paso 5.10
5.10	Determinar el AMAD efectivo	*Evaluación de AMAD efectivo: Datos de heces en los 3 primeros días / actividad en pulmones al cabo del tercer día –* ***H(1-3)/P(3) = (31+91+2,5)/62 = 2,0****:para el Americio tipo M, esto da un AMAD efectivo de* ***1,3 μm****. (Ver la figura 8,3)*	Ir al paso 5.11
5.11. y 5.11.1	Evaluar la dosis ajustando el tipo de absorción	*Suponiendo AMAD = 1,3 μm, tipo M, se obtiene la siguiente estimación:* ***Incorporación = 403 Bq, E(50) = 15,8 mSv*** *El ajuste de los datos no es bueno,* χ^2_0 ***=103*** *con 17 grados de libertad. El correspondiente* ***p-valor*** *es menor que* ***0,05****. Además la inspección visual del ajuste en pulmones y orina es pobre.* ***Se rechaza el ajuste*** *ICRP 68 recomienda tipo M para todos los compuestos de Americio. Sin embargo, se puede realizar un ajuste con IMBA Professional* ^{TM} *suponiendo* ***tipo S****. En este caso, suponiendo incorporación única y AMAD de 1,3 μm se obtiene una incorporación de* ***771 Bq*** *y una E(50) de* ***11,2 mSv****. El ajuste de los datos no es bueno,* χ^2_0 ***= 60,7*** *con 17 grados de libertad. EL correspondiente* ***p-valor*** *es menor que* ***0,05****. Además la inspección visual del ajuste en pulmones y orina es pobre.* ***Se rechaza el ajuste***	Ir al paso 5.13
5.13	Realizar el ajuste con una mezcla de Tipos de Absorción	*En este ejercicio se requirió a los participantes que determinaran parámetros específicos de absorción como se describe en la etapa 5C*	Ir la etapa 5C


100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Tiempo (d)

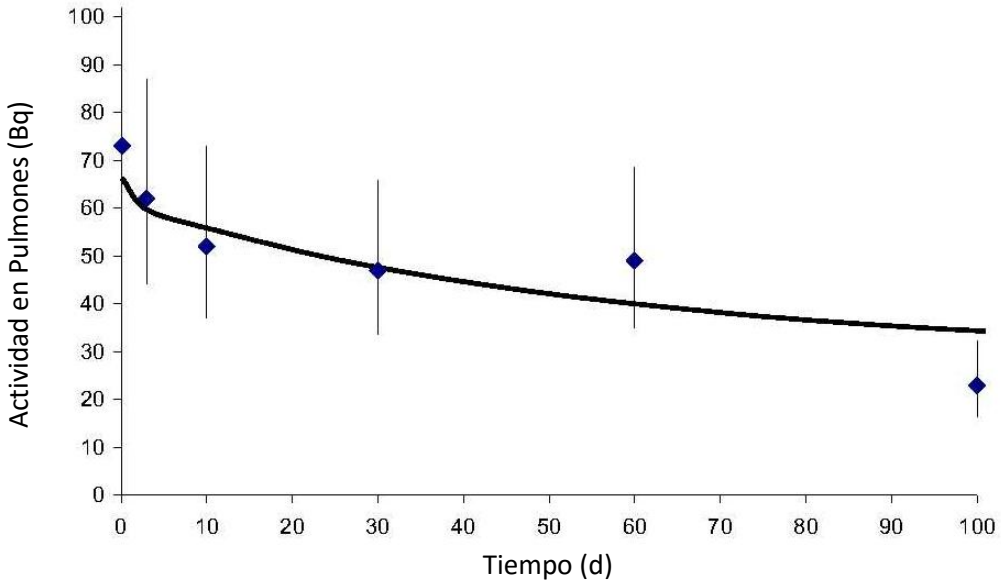

1.0E-01
1.0E-02
1.0E-03
1.0E-04
Excreción urinaria (Bq/d)
0
10
20
30
40
50
60
70
Tiempo (d)

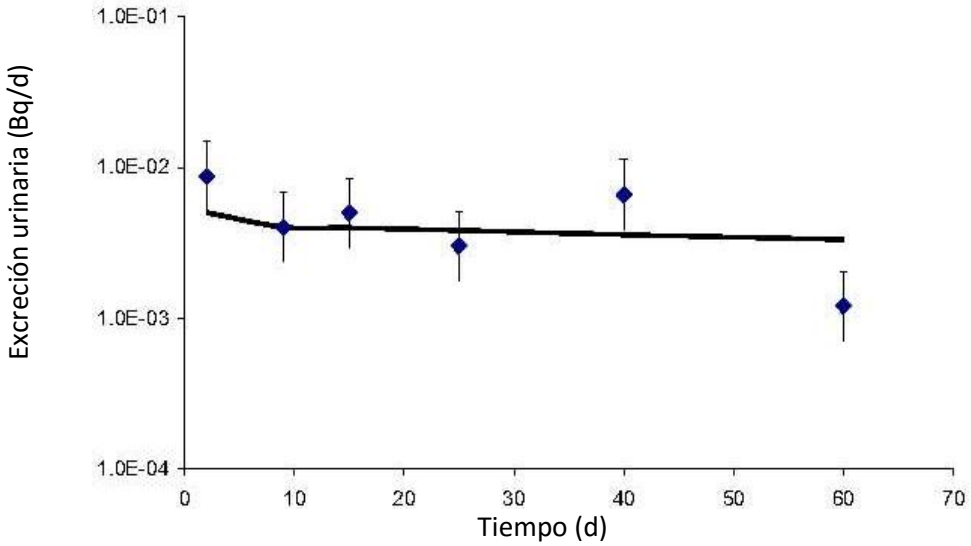


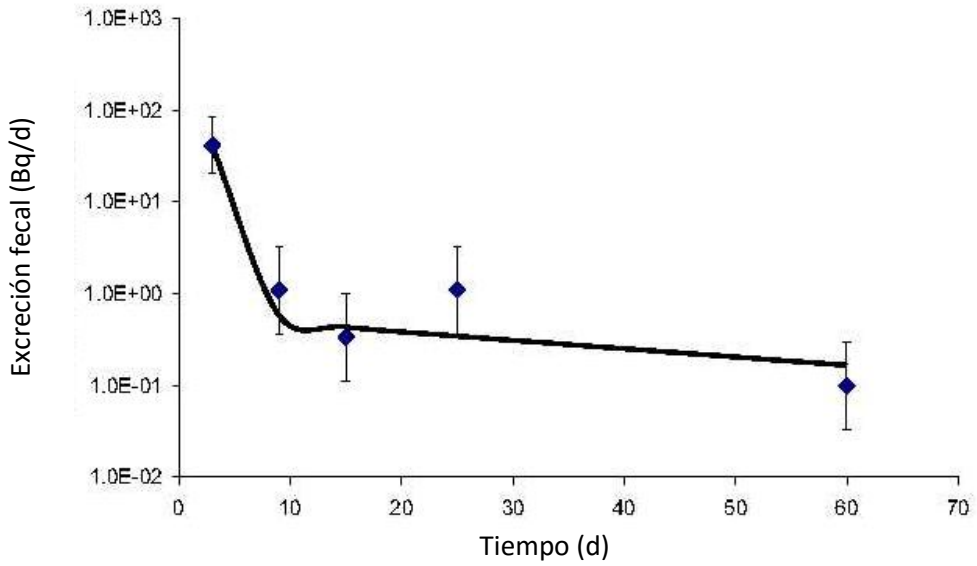
Ajuste de los modelos a las actividades en pulmón y a los datos de las excreciones urinaria y fecal. El ajuste del Americio tipo *M* está representado por la línea continua y la tipo *S* por la discontinua.

Evaluación de la etapa 5c del caso ELP3

Paso	**Explicación**	***Comentarios***	**Acción siguiente**
5.16 y 5.16.1	Determinar valores específicos de los parámetros de absorción del modelo HTRM	*La estimación suponiendo un tipo **M** de absorción para el Am-241, sobreestima los valores de la excreción urinaria pero subestima la actividad en pulmones. Esto es indicativo de que el modelo supone una excesiva remoción de la actividad en pulmones a sangre. Por tanto conviene reducir tanto la fracción de disolución rápida f_r como la tasa de disolución lenta s_s.* *En primer lugar, reduciendo la fracción de disolución rápida f_r desde **0,1** a **0,001** se reduce el coeficiente de correlación del ajuste χ^2_0 de **103** a **68**.* *Reduciendo ahora s_s desde **0,005 d^{-1}** a **0,0008 d^{-1}** se reduce el coeficiente de correlación del ajuste χ^2_0 de **68** a **10**. Esto proporciona un ajuste aceptable de los datos.* *Los resultados finales con estos parámetros del modelo HRTM **f_r = 0,001**, **s_r = 100 d^{-1}**, **s_s = 0,0008 d^{-1}** y **f_b = 0** son los siguientes:* ***Incorporación = 525 Bq, E(50) = 11,5 mSv*** *El ajuste de los datos es bueno como se observa en las figuras siguientes con **χ^2_0 = 10** con 17 grados de libertad. El **valor-p** correspondiente es de **0,9** y por tanto el ajuste no se rechaza.* *Los ajustes no se rechazan puesto que el test estadístico de χ^2 no falla (**p-valores > 0,05**). Más aún la revisión visual de los ajustes de las actividades en pulmón, en orina y heces es correcta.*	Ir al paso 5.15.1
5.15.1	Registrar la dosis con todos los parámetros	*Se registra la dosis y la incorporación estimadas junto con los valores de los parámetros utilizados:* ***Incorporación = 525 Bq de Am-241*** ***Dosis efectiva = 11,5 mSv*** ***AMAD = 1,3*** ***Valores específicos de los parámetros de absorción del modelo HTRM: f_r = 0,0001, s_r = 100 d^{-1}, s_s = 0,0008 d^{-1} y f_b = 0***	Fin


Actividad en Pulmones (Bq)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
Tiempo (d)


Excreción urinaria (Bq/d)
1.0E-01
1.0E-02
1.0E-03
1.0E-04
0
10
20
30
40
50
60
70
Tiempo (d)



Ajuste de los modelos a las actividades en pulmón y a los datos de las excreciones urinaria y fecal utilizando valores específicps de parámetros de absorción

Resumen de las incorporaciones estimadas de Am-241 y de las dosis resultantes [(a)]

Etapa del procedimiento de evaluación	AMAD (μm)	Tipo de Absorción	Bondad del ajuste		Comentarios	Incorporación (Bq)	E(50) (mSv)
			χ^2_0 [(b)]	p-valor [(c)]			
5.5	5	M	128	< 1E-10	Rechazar el ajuste	684	18,5
5.11	1,3	M	103	2,8E-14	Rechazar el ajuste	405	15,8
5.11	1,3	S	61	8,0E-07	Rechazar el ajuste	771	11,2
5.13	1,3	Valores específicos	10	0,9	Ajuste aceptado y fin de la evaluación	**525**	**11,5**

[(a)] Las estimaciones se obtuvieron ajustando simultáneamente los datos obtenidos de los modelos con los valores de actividad de pulmones, orina y heces con el código IMBA.

[(b)] El valor esperado de χ^2 es igual al número de grados de libertad (número de datos disponibles-1 = 17, dado que los valores de actividad en heces para los días 1, 2 y 3 se han considerado como una única medida para un periodo de recogida de 3 días)

[(c)] El p-valor indica la probabilidad de que χ^2 sea mayor que χ^2_0 para 17 grados de libertad.

La tabla final de la evaluación de referencia es la siguiente:

Magnitud	**Valor**
AMAD efectivo (μm)	1,3
Parámetros específicos del modelo pulmonar HRTM	-
- Fracción de disolución rápida, f_r	0,001
- Tasa de disolución rápida s_r (d^{-1})	100
- Tasa de disolución lenta s_s (d^{-1})	0,0008
f_1 (fracción absorbida desde el tracto gastrointestinal)	0,0005
Incorporación (Bq)	525
Dosis efectiva comprometida (mSv)	11,5
Paso final de la Guía IDEAS	5.16 – 5.16.1 - 5.15.1

13.4 Ingestión de Cs-137 (Caso ELP4)

El suceso

Descripción del área de trabajo

Laboratorio de investigación.

Motivo de la vigilancia; suceso iniciador

La persona estaba extrayendo una cantidad de Cloruro de cesio de un vial multidosis. El vial contenía ***250 MBq*** de ***Cs-137***. Cuando la persona pinchó el tapón de goma del vial con una aguja hipodérmica, algo de líquido salió expulsado del vial hacia su cara.

Acciones emprendidas

Se estableció un programa de vigilancia de medidas en todo el cuerpo.

Información adicional

Forma química

Cloruro de Cesio

Características físicas, tamaño de partícula

Líquido

Intervenciones de otro tipo (agentes quelantes, bloqueadores, etc.)

No

Datos de vigilancias de todo el cuerpo

Medidas de actividad en todo el cuerpo

Momento de la medida tras la incorporación (d)	Actividad de Cs-137 en el todo el cuerpo (Bq)
1	8,8E+04
8	6,0E+04
15	3,0E+04
17	9,3E+04
30	8,3E+04
46	4,8E+05
50	4,6E+05
60	4,4E+05

Datos personales

Sexo

Masculino

Edad

35 años

Peso

75 kg

Otros comentarios relevantes para la estimación de la incorporación y de la dosis

Los datos de las medidas en todo el cuerpo indican la posibilidad de que ocurriera otra incorporación entre los días 30 y 46. Cuando se le preguntó al individuo, este recordó que en efecto le había sucedido un incidente semejante pero no podía recordar cuando había ocurrido. Para este ejercicio, supóngase por simplicidad que ambas incorporaciones lo fueron por ingestión.

Estímese la incorporación y la dosis efectiva comprometida E(50) utilizando únicamente hojas de cálculo.

Más aún, evaluar el caso con el uso de al menos uno de los tres software disponibles.

Téngase en cuenta la posible presencia de datos fuera de rango (“outliers”) en las medidas de todo el cuerpo.

Suminístrese los resultados finales completando las siguientes tablas:

Estimación de la primera incorporación y dosis resultante

Estímese la primera incorporación y la dosis efectiva comprometida resultante E(50) considerando únicamente las cinco primeras medidas de todo el cuerpo (medidas desde el día 1 al 30). Rellénese la tabla siguiente:

Evaluación de la primera incorporación y dosis resultante

Magnitud	**Valor**
Momento de la primera incorporación (días)	0
Vía de incorporación	Ingestión
¿Datos fuera de rango? Si es que sí, ¿Cuántos?	
Incorporación (Bq)	
Dosis efectiva comprometida (mSv)	
Paso final de la Guía IDEAS	

Estimación de la segunda incorporación y dosis resultante

Estímese la segunda incorporación y la dosis efectiva comprometida resultante E(50) considerando únicamente todas las medidas de todo el cuerpo. Rellénese la tabla siguiente:

Evaluación de la segunda incorporación y dosis resultante

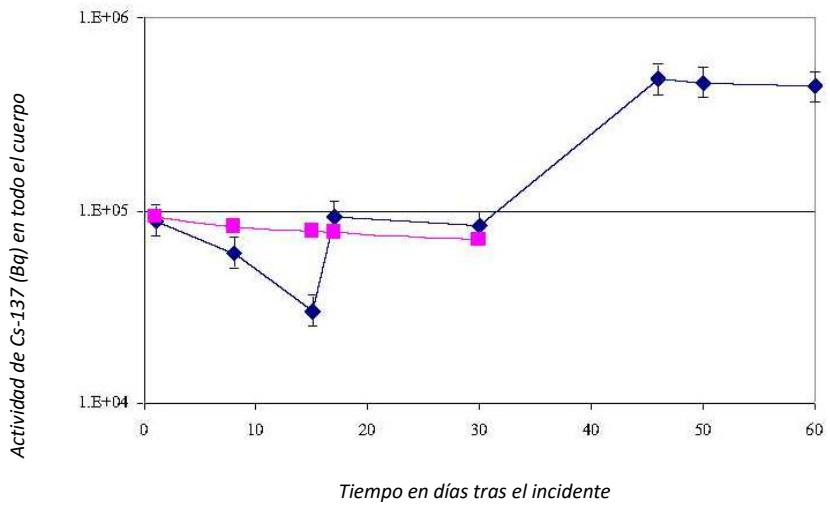
Magnitud	**Valor**
Momento de la primera incorporación (días)	
Vía de incorporación	Ingestión
¿Datos anómalos? Si es que si, ¿Cuántos?	
Incorporación (Bq)	
Dosis efectiva comprometida (mSv)	
Paso final de la Guía IDEAS	

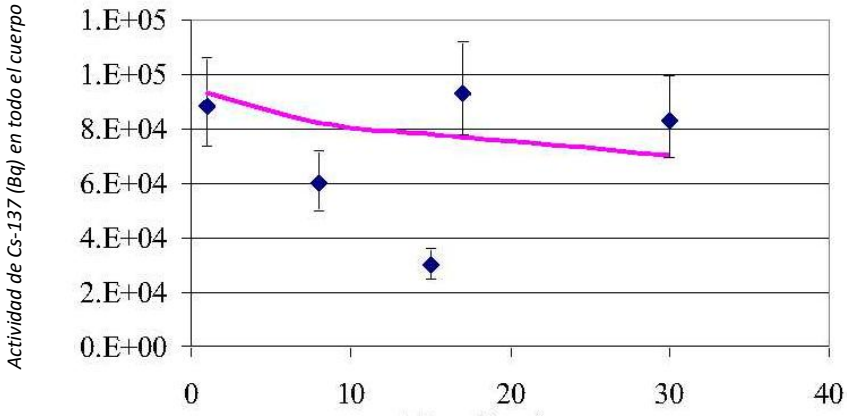
Solución de referencia del Caso ELP4

El caso se evalúa siguiendo la ***Guía IDEAS***. Las siguientes tablas presentan para cada uno de los diagramas de flujo la descripción de los diferentes apartados y orientaciones relacionadas con la aplicación de la Guía a este ejercicio ELP4. Las tablas proporcionan la numeración de cada paso, comentarios y razones de porqué se utiliza ese paso y las acciones llevadas a cabo durante la evaluación.

Evaluación de la etapa primera incorporación

Paso	**Explicación**	***Comentarios***	**Acción siguiente**
1.1	Identificar los valores medidos	*Parte del líquido de un vial que contenía **Cs-137** fue proyectado a la cara de la persona. La primera medida de todo el cuerpo se llevó a cabo **1 día** después del incidente. La actividad medida fue de **8800 Bq**. Vigilancia especial*	Ir al paso 1.2
1.2	¿$M < M_c$?	*El valor de M_c para medida en todo el cuerpo se ha calculado para ingestión con un coeficiente de dosis de **1,3E-08 Sv/Bq** y la función de retención para **1 día**. En este caso entonces, M_c = **7540 Bq** , por tanto $M > M_c$*	Ir al paso 1.3
1.3	Exposición por encima del nivel 0	*Se necesita evaluación de dosis*	Ir a la Etapa 2, Paso 2.0
2.0	Entender el caso	*Utilizando únicamente la primera medida de todo el cuerpo **1 día** después del incidente, se estima una incorporación de **90 kBq** y un valor de **E(50)** de **1,17 mSv**.*	Ir al paso 2.1
2.1	Evaluación de la incertidumbre de ***M***	*Según la tabla 4.8 de la Guía para medidas directas de Cs-137 se obtiene un SF_B de **1,15** y un SF_A de **1,07**, por tanto el total **SF = 1,2**.*	Ir al paso 2.2

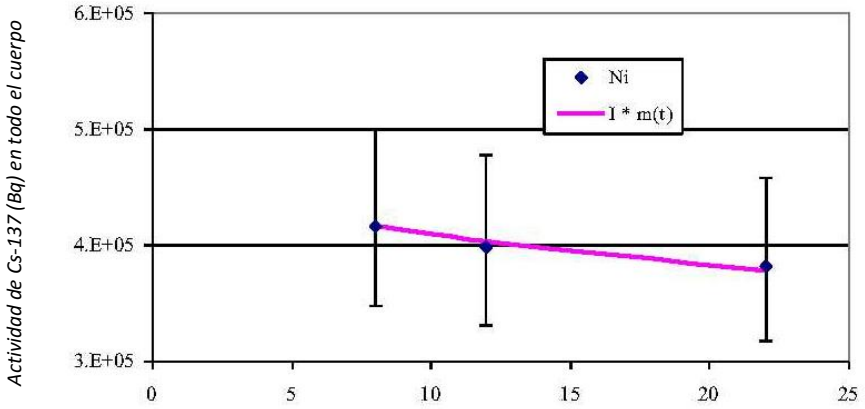
2.2	Contribución de incorporaciones anteriores	*No hay contribución de incorporaciones anteriores, por tanto* ***P = 0***	Ir al paso 2.3
2.3	¿Es $M > P*SF^2$?	*Si puesto que* ***P = 0***	Ir al paso 2.3.1.
2.3.1	¿Nueva incorporación?	*Hay evidencia de una nueva incorporación significativa, Puesto que* ***P = 0; N = M***	Ir a la etapa 3, paso 3.1
3.1	¿Vigilancia rutinaria?	*No, es una vigilancia especial*	Ir a la etapa 4, paso 4.1
4.1	Identificar la vía de incorporación	*La vía de incorporación NO es inhalación*	Ir al paso 4.2
4.2	Identificar la vía de incorporación	*La vía de incorporación es ingestión. Se necesita una evaluación especial para ingestión*	Ir a la etapa 6A, paso 6.1
6.1	Identificación y preparación de los datos de las medidas	*Evaluación de un dato fuera de rango ("outlier"). El valor* ***M*** *de la medida del día 15 parece ser muy bajo. Chequear si este valor se separa en un factor* SF^3 *de la tendencia del resto de valores.* *M (tendencia esperada) =* $7{,}74.10^4$ *Bq evaluada sobre la base de una incorporación estimada utilizando las otras 4 medidas (*$9{,}50.10^4$ *Bq) y un valor de m(t) para ingestión para 15 d = 0,815 Bq por Bq incorporado.* *Medida real en el día 15 =* ***3E+04 Bq*** $\boldsymbol{SF^3 = 1{,}2^3 = 1{,}728}$ $\boldsymbol{M(tendencia\ esperada)/SF^3 = 7{,}74E{+}04/1{,}728 = 4{,}48E{+}04\ Bq}$ $\boldsymbol{M(medida\ real) < M(tendencia\ esperada)/SF^3}$ *Por tanto,* ***M(medida real, para t=15 días)*** *es un dato* ***fuera de rango****.* *Medidas en todo el cuerpo*  	Ir a paso 6.2
		Segunda posible incorporación entre los días 31 al 45	
6.2	Contribución de anteriores incorporaciones	*No hay contribución de anteriores incorporaciones:* ***P = 0***	Ir al paso 6.3
6.3	Asignar valores por defecto a los parámetros	*Incorporación única,* $\boldsymbol{f_1 = 1}$	Ir al paso 6.4
6.4	Momento de la incorporación	*El momento de la incorporación es conocido*	Ir al paso 6.5

6.5	Evaluación de la primera incorporación y de la dosis resultante	*La dosis de calcula con valores por defecto de los parámetros. Para las primeras **4** medidas en todo el cuerpo, desde el día **1** al **30**, con **SF = 1,2** y un **e(50)$_{ing}$** de **1,3E-08 Sv/Bq**.* ***I = 9,5E+04 Bq*** ***E(50) = 1,23 mSv***	Ir al paso 6.6
6.6	¿Dosis < 1 mSv?	*No*	Ir a la etapa 6B, paso 6.7
6.7	¿Hay suficientes datos?	*De la tabla 6.2 de la Guía, como mínimo se requieren 3 medidas en 90 días. Aquí se dispone de 4 datos, por lo tanto **SI** hay datos suficientes*	Ir al paso 6.8
6.8	Momento de la incorporación	*Se conoce el momento de la incorporación*	Ir al paso 6.9
6.9	Evaluación de la dosis con el valor de f_1 por defecto	*Mismos datos que en la paso 6.5* ***I = 9,5E+04 Bq*** ***E(50) = 1,23 mSv***	Ir al paso 6.11
6.11	Comprobar la bondad del ajuste	*Criterio 1: El valor observado de chi-cuadrado se evalúa con al siguiente ecuación:* $$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^{n_{TC}} \left(\frac{\boldsymbol{ln}(N_{TCi}) - \boldsymbol{ln}\,(I.\boldsymbol{m}_{TC}(t_i))}{\boldsymbol{ln}\,(\boldsymbol{SF}_{TC})} \right)^2$$ *TC = Todo el cuerpo* *El valor de χ^2_0 es de **4,96** con **3** grados de libertad. Ello representa un **p-valor** de **0,175** y por lo tanto el ajuste no se rechaza.* *Criterio 2: la inspección visual es aceptable, con dos valores por encima y dos por debajo de la previsión del modelo.* *Medidas en todo el cuerpo*  	Ir al paso 6.12
6.12	¿Dosis < 6 mSv?	*Sí*	Ir al paso 6.12.1
6.12.1	Registrar la dosis con todos los parámetros	***Incorporación única en el día 0, f_1 = 1, e(50)$_{ing}$ = 1,3E-08 Sv/Bq*** ***I_1 =9,495E+04 Bq*** ***E(50) = 1,23 mSv*** *Para el valor de referencia obtenido con el software IMBA™ ver la segunda evaluación de la incorporación*	Ir al paso 6.12

Evaluación de la segunda incorporación

Paso	Explicación	*Comentarios*	Acción siguiente
1.1	Determinar los valores medidos	*Se supone que ha ocurrido una segunda incorporación después del día **30** afectando a la medida del día **46**: **M = 4,8E+05 Bq**. Momento de la incorporación igual al punto medio entre estas dos medidas.*	Ir al paso 1.2
1.2	¿$M < M_c$?	*El valor de M_c = 290 Bq para medida en todo el cuerpo se ha calculado para ingestión con un coeficiente de dosis de **1,3E-08 Sv/Bq** y la función de retención para **8 días** m(8) = 0,86. En este caso entonces $M > M_c$*	Ir al paso 1.3
1.3	Exposición por encima del nivel 0	*Se necesita evaluación de dosis*	Ir a la Etapa 2, Paso 2.0
2.0	Entender el caso	*Con el valor de la **función de retención** del Cs-137 para **ingestión** y para **8** días (punto medio del intervalo de vigilancia) y con el coeficiente de dosis de **1,3E-08 Sv/Bq**, se obtiene:* ***I = 6E+05 Bq, y E(50) = 7,3 mSv***	Ir al paso 2.1
2.1	Evaluación de la incertidumbre de ***M***	*Según la tabla 4.8 de la Guía para medidas directas de Cs-137 se obtiene un SF_B de **1,15** y un SF_A de **1,07**, por tanto el **SF total = 1,2**.*	Ir al paso 2.2
2.2	Contribución de incorporaciones anteriores	*Cálculo de la contribución de la anterior incorporación:* *Fecha = 0, días = 46, m(46) = 0,668 Bq por Bq incorporado* ***I_1 = 94950 Bq*** ***P(Bq) = 63427 Bq***	Ir al paso 2.3
2.3	Es $M > P*SF^2$?	***SF^2 = 1,44; M = 4,8E+05 Bq; $P*SF^2$ = 9,1E+04*** ***Sí**, hay una nueva incorporación significativa*	Ir al paso 2.3.1.
2.3.1	***N = M-P***	***N = 4,17E+05 Bq***	Ir a la etapa 3, paso 3.1
3.1	¿Vigilancia rutinaria?	*No, es una vigilancia especial*	Ir a la etapa 4,
4	Identificar la vía de incorporación	*Ingestión. Evaluación especial de ingestión*	Ir a la etapa 6, paso 6.1
6.1	Identificación y preparación de los datos de las medidas	*Posible segunda incorporación entre los días 30 y 46. Los datos disponibles son:* *Día M_i (Bq)* ***46 4,8E+05*** ***50 4,6E+05*** ***60 4,4E+05***	Ir a paso 6.2
6.2	Contribución de anteriores incorporaciones	***I_1 = 94950 Bq*** *Día m(t) P_i (Bq) N_i (Bq)* ***46 0,668 63427 4,17E+05*** ***50 0,651 61813 3,98E+05*** ***60 0,611 58015 3,82E+05***	Ir a paso 6.3
6.3	Asignar valores por defecto a los parámetros	***Incorporación única, f_1= 1***	Ir a paso 6.4
6.4	Momento de la incorporación	*El momento de la incorporación no es conocido*	Ir a la etapa 6B, paso 6.7
6.7	¿Hay suficientes datos?	*De la tabla 6.2 de la Guía se requiere como mínimo 3 medidas de todo el cuerpo en un periodo de 90 días. Se dispone de 3 medidas, por lo tanto **SI** hay datos suficientes*	Ir a paso 6.8
6.8	Momento de la incorporación	*El momento de la incorporación no es conocido*	Ir a paso 6.10

<table>
<tr><td>6.10</td><td>Evaluación de dosis con valores por defecto de f_1 ajustando el momento de la incorporación</td><td>Primer intento sobre el momento de la incorporación: punto medio del intervalo de vigilancia en días (31-45) ⇒ día 38
e(50) = 1,3E-08 Sv/Bq
I_2 = 484420 Bq
E(50) = 6,3 mSv</td><td>Ir a paso 6.11</td></tr>
<tr><td>6.11</td><td>Chequear la bondad del ajuste</td><td>Criterio 1: El valor observado de chi-cuadrado se evalúa con al siguiente ecuación:
$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^{n_{TC}} \left(\frac{ln(N_{TCi}) - ln\,(I.m_{TC}(t_i))}{ln\,(SF_{TC})} \right)^2$$
TC = Todo el cuerpo
El valor de χ^2_0 es de 8,9E-03 con 2 grados de libertad. Ello representa un p-valor de 0,9956 y por lo tanto el ajuste no se rechaza.

Criterio 2: la inspección visual es aceptable,
Segunda incorporación


Tiempo en días tras la segunda incorporación

Análisis de sensibilidad de la segunda incorporación
<table>
<tr><th>Días tras al 2ª incorporación</th><th>Chi-cuadrado</th><th>p-valor</th><th>Incorporación (Bq)</th><th></th></tr>
<tr><td>31</td><td>0,0087</td><td>0,9957</td><td>508429</td><td></td></tr>
<tr><td>32</td><td>0,0092</td><td>0,9954</td><td>505430</td><td></td></tr>
<tr><td>33</td><td>0,0087</td><td>0,9957</td><td>502041</td><td></td></tr>
<tr><td>34</td><td>0,0082</td><td>0,9959</td><td>498698</td><td></td></tr>
<tr><td>35</td><td>0,0087</td><td>0,9957</td><td>495196</td><td></td></tr>
<tr><td>36</td><td>0,0080</td><td>0,9960</td><td>491748</td><td>El mejor</td></tr>
<tr><td>37</td><td>0,0084</td><td>0,9958</td><td>488152</td><td></td></tr>
<tr><td>38</td><td>0,0089</td><td>0,9956</td><td>484420</td><td>Punto medio</td></tr>
<tr><td>39</td><td>0,0097</td><td>0,9951</td><td>480561</td><td></td></tr>
<tr><td>40</td><td>0,0122</td><td>0,9939</td><td>476396</td><td></td></tr>
<tr><td>41</td><td>0,0173</td><td>0,9914</td><td>471774</td><td></td></tr>
<tr><td>42</td><td>0,0217</td><td>0,9866</td><td>466721</td><td></td></tr>
<tr><td>43</td><td>0,0464</td><td>0,9771</td><td>460942</td><td></td></tr>
<tr><td>44</td><td>0,0850</td><td>0,9584</td><td>454188</td><td></td></tr>
<tr><td>45</td><td>0,1435</td><td>0,9307</td><td>446367</td><td></td></tr>
</table>
Mejor ajuste, el del día 36</td><td>Ir a paso 6.12</td></tr>
</table>

		Punto medio del intervalo: ***día 38*** *Debido a que no hay diferencias significativas en los valores ajustados de actividad, se supone la mejor estimación de la incorporación la obtenida para el día 38.* *La evaluación también puede llevarse a cabo utilizando el software IMBA™* *El procedimiento para realizar la evaluación es como sigue:* - *Seleccionar el Cs-137 como el radionúclido indicador.* - *Introducir los valores y fechas de las medidas de todo el cuerpo en la ventana "Bioassay Calculation".* - *Introducir un valor de SF = 1,2 para todas las medidas y escoger la distribución de error "LOGNORMAL".* - *No tener en cuenta el valor para 15 días.* - *Introducir los valores por defecto para ingestión fijando la primera incorporación en el día d=0.* - *Introducir una segunda incorporación en el día d=38.* - *Seleccionar también para esta segunda incorporación los parámetros por defecto de ICRP para ingestión.* - *Calcular las incorporaciones: Los resultados de referencia son 93988 Bq y 479110 Bq.* - *Calcular los valores respectivos de E(50): 1,28 mSv y 6,51 mSv.*	
6.12	¿Dosis < 6 mSv?	***No; E(50) = 6,3 mSv***	Ir a la etapa 6C, paso 6.13
6.13	¿Hay suficientes datos?	*De la tabla 6.2 de la Guía se requieren 5 medidas de todo el cuerpo en un periodo de 90 días, por lo tanto* ***NO*** *hay datos suficientes y los resultados deben tratarse con precaución.*	Ir a paso 6.14
6,14	Chequear el valor de f_1	*Sin un software apropiado no es posible verificar si el valor de* $f_1 = 1$ *es apropiado o no, por tanto se sigue manteniendo que* $f_1 = 1$	Ir a paso 6.14.1
6.14.1	Chequear la bondad del ajuste	*EL ajuste es apropiado tal y como se observó en el paso 6.11*	Ir a paso 6.12.1
6.12.1	Registrar la dosis con todos los parámetros	***Día de la incorporación: 38*** ***Incorporación única*** $f_1 = 1$ $e(50)_{ing} = 1{,}3E\text{-}08$ ***Sv/Bq*** ***I(Bq) = 484420*** ***E(50) = 6,3 mSv*** *Según el software IMBA™:* *I(Bq) = 479110* $e(50)_{ing}$ *(Sv/Bq)* $= 1{,}36.10^{-8}$ *E(50) (mSv) = 6,51*	Fin

Las tablas finales de esta evaluación de referencia son las siguientes

Evaluación de la primera incorporación y dosis resultante

Magnitud	**Valor**
Momento de la primera incorporación (días)	0
Vía de incorporación	Ingestión
¿Datos fuera de rango? Si es que si, ¿Cuántos?	Si, uno
Incorporación (Bq)	93988
Dosis efectiva comprometida (mSv)	1,28
Paso final de la Guía IDEAS	Paso 6.12-6.12.1
Software utilizado	IMBA™

Evaluación de la segunda incorporación y dosis resultante

Magnitud	**Valor**
Momento de la primera incorporación (días)	38
Vía de incorporación	Ingestión
¿Datos s? Si es que si, ¿Cuántos?	No
Incorporación (Bq)	479110
Dosis efectiva comprometida (mSv)	6,3
Paso final de la Guía IDEAS	Paso 6.14.1-6.12.1
Software utilizado	IMBA™

14. Anexos

14.1 Anexo 1 - Composición isotópica del Uranio natural, enriquecido y empobrecido y de materiales con Plutonio que se encuentran en la industria nuclear

Las actividades específicas del Uranio se presentan en la tabla ***14.1***.

Tabla 14.1: Actividades específicas del Uranio

Radionúclido	Periodo[a,b](años)	Masa atómica[c] (u)	Actividad específica (Bq/g)
U-234	(2,455 ± 0,006) 10^5	234,0409521	2,3022E+08
U-235	(7,040 ± 0,010) 10^8	235,0439299	7,9939E+04
U-238	(4,468 ± 0,005) 10^9	238,0507882	1,2347E+04
U-236	(2,343 ± 0,006) 10^7	236,0455680	2,3917E+06

Número de Avogadro = 6,02214E+23 mol^{-1}
a Datos atómicos y nucleares del Laboratorio Nacional Henri Becquerel http://www.nucleide.org/Nucdata.htm
b 1 año = 365,2421899 días según se establece en la Nota técnica DETECS/LNHB/2006-58. CEA/LNHB (2006) hptt://www.nucleide.org/DDEP WG/periodes 2006.pdf
c Referencia (Audi 2003)

Las siguientes tablas ***14.2*** a ***14.4*** muestran la composición del uranio natural, enriquecido y empobrecido en términos de actividad. Nótese que la composición en términos de masa es completamente diferente.

Tabla 14.2: Composición isotópica del Uranio natural

Radionúclido	Composición isotópica en % en peso [a]	% de la actividad Alfa	Actividad específica Alfa por gramo de U (Bq/g) [b]
U-238	99,2837	49,03	1,23E+04
U-236	0,0000	0,00	0,00E+00
U-235	0,7110	2,26	5,68E+02
U-234	0,005329	48,72	1,23E+04
U-233	0,0000	0,00	0,00E+00
U-232	0,0000	0,00	0,00E+00
Actividad Total Alfa en Bq/g			2,51E+04
Relación de actividades Alfa entre el U-234 y el U-238			0,994
Relación de actividades Alfa entre el U-235 y el U-238			0,046

a Composición está dada como % en peso del total de los isótopos del Uranio
b actividad alfa por gramo de uranio
Berglund (2011) para la composición isotópica

Tabla 14.3: Composición isotópica del Uranio enriquecido (3,7%)

Radionúclido	Composición isotópica en % en peso [a]	% de la actividad Alfa	Actividad específica Alfa por gramo de U (Bq/g) [b]
U-238	92,264	12,69	1,15E+04
U-236	0,002	0,05	4,78E+01
U-235	3,701	3,27	2,96E+03
U-234	0,033	83,99	7,60E+04
U-233	0,000	0,00	0,00E+00
U-232	0,000	0,00	0,00E+00
Actividad Total Alfa en Bq/g			9,05E+04
Relación de actividades Alfa entre el U-234 y el U-238			6,621
Relación de actividades Alfa entre el U-235 y el U-238			0,258

a Composición está dada como % en peso del total de los isótopos del Uranio
b actividad alfa por gramo de uranio
Óxido industrial UO_2 (Ansoborlo 1995)

Tabla 14.4: Composición isotópica del Uranio empobrecido (0,2% en peso)

Radionúclido	Composición isotópica en % en peso	% de la actividad Alfa	Actividad específica Alfa por gramo de U (Bq/g)
U-238	99,800	88,57	1,24E+04
U-236	0,0027	0,46	6,46E+01
U-235	0,1940	1,11	1,55E+02
U-234	0,0006	9,86	1,38E+03
U-233	0,0000	0,00	0,00E+00
U-232	0,0000	0,00	0,00E+00
Actividad Total Alfa en Bq/g			1,40E+04
Relación de actividades Alfa entre el U-234 y el U-238			0,111
Relación de actividades Alfa entre el U-235 y el U-238			0,012

a Composición está dada como % en peso del total de los isótopos del Uranio
b actividad alfa por gramo de uranio
Ejemplo de Uranio empobrecido tomado de una muestra de un frotis del informe UNEP (UNEP 2002)

Tabla 14.5: Actividades específicas de los radionucleidos de Plutonio

Radionúclido	Periodo (años)[a,b]	Masa atómica (u)[c]	Actividad específica (Bq/g)
Pu-238	87,74 ± 0,03	238,0495599	6,3331E+11
Pu-239	(2,4100 ± 0,0011) 10^4	239,0521634	2,2960E+09
Pu-240	(6,561 ± 0,007) 10^3	240,0538135	8,3985E+09
Pu-241	14,33 ± 0,04	241,0568515	3,8293E+12
Pu-242	(3,73 ± 0,03) 10^5	242,0587426	1,4650E+08
Am-241	432,6 ± 0,6	241,0568291	1,2685E+11

a Datos atómicos y nucleares del Laboratorio Nacional Henri Becquerel http://www.nucleide.org/Nucdata.htm
b 1 año = 365,2421899 días según se establece en la Nota técnica DETECS/LNHB/2006-58. CEA/LNHB (2006) hptt://www.nucleide.org/DDEPWG/periodes 2006.pdf
c Referencia (Audi 2003)

Tabla 14.6: Composición isotópica del Plutonio para armamento nuclear

Radionúclido	Composición isotópica en % en peso de Pu+Am	% de la actividad Alfa del Plutonio	% de la actividad Alfa total	% de la actividad total
Pu-238	0,05	10,70	10,70	0,94
Pu-239	93,0	72,26	72,26	6,36
Pu-240	6,1	17,03	17,03	1,50
Pu-241	0,8	-	-	91,19
Pu-242	0,05	0,00	0,00	0,00
Am-241	0,0	-	-	-
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Plutonio				**10**
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Pu-239 + Pu-240				**12**
Relación de actividades Alfa del Am-241 a la del Pu-241				**0,000**

Referencia (DOE 1998)

Tabla 14.7: Composición isotópica del Plutonio para combustible nuclear

Radionúclido	Composición isotópica en % en peso de Pu+Am	% de la actividad Alfa del Plutonio	% de la actividad Alfa total	% de la actividad total
Pu-238	0,10	17,53	17,53	0,53
Pu-239	84,4	53,64	53,64	1,64
Pu-240	12,4	28,83	28,83	0,88
Pu-241	3,0	-	-	96,95
Pu-242	0,1	0,00	0,00	0,00
Am-241	0,0	-	-	-
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Plutonio				**32**
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Pu-239 + Pu-240				**39**
Relación de actividades Alfa del Am-241 a la del Pu-241				**0,000**

Referencia (DOE 1998)

Tabla 14.8: Composición isotópica del Plutonio de centrales nucleares de agua ligera (LWR) tras su descarga del núcleo

Radionúclido	Composición isotópica en % en peso de Pu+Am	% de la actividad Alfa del Plutonio	% de la actividad Alfa total	% de la actividad total
Pu-238	1,26	71,04	68,33	1,47
Pu-239	56,62	11,57	11,13	0,24
Pu-240	23,18	17,33	16,67	0,36
Pu-241	13,86	-	-	97,85
Pu-242	4,73	0,06	0,06	0,00
Am-241	0,35	3,95	3,80	0,08
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Plutonio				**47**
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Pu-239 + Pu-240				**163**
Relación de actividades Alfa del Am-241 a la del Pu-241				**0,001**

Referencia (OCDE 1989)

Tabla 14.9: Composición isotópica del combustible nuclear gastado de Uranio tras su separación química

Radionúclido	Composición isotópica en % en peso de Pu+Am	% de la actividad Alfa del Plutonio	% de la actividad Alfa total	% de la actividad total
Pu-238	1,49	73,59		2,31
Pu-239	59,50	10,65		0,33
Pu-240	23,98	15,71		0,49
Pu-241	10,33	-		96,86
Pu-242	4,0	0,05		0,00
Am-241	0,0	-		-
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Plutonio				**31**
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Pu-239 + Pu-240				**117**
Relación de actividades Alfa del Am-241 a la del Pu-241				**0,002**

Referencia (DOE 1998)

Tabla 14.10: Composición isotópica del Plutonio de bajo quemado, 5 años tras su separación química

Radionúclido	Composición isotópica en % en peso de Pu+Am	% de la actividad Alfa del Plutonio	% de la actividad Alfa total	% de la actividad total
Pu-238	0,001	0,24	0,23	0,04
Pu-239	93,5	80,82	77,03	11,93
Pu-240	5,99	18,94	18,05	2,80
Pu-241	0,397	-	-	84,51
Pu-242	0,001	0,00	0,00	0,00
Am-241	0,103	4,92	4,69	0,73
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Plutonio				**5,7**
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Pu-239 + Pu-240				**5,7**
Relación de actividades Alfa del Am-241 a la del Pu-241				**0,009**

Referencia (PNNL 2009)

Tabla 14.11: Composición isotópica del Plutonio de alto quemado 5 años tras su separación química

Radionúclido	Composición isotópica en % en peso de Pu+Am	% de la actividad Alfa del Plutonio	% de la actividad Alfa total	% de la actividad total
Pu-238	1,85	79,23	65,70	3,14
Pu-239	63,3	9,83	8,15	0,39
Pu-240	19,2	10,90	9,04	0,43
Pu-241	9,27	-	-	95,22
Pu-242	3,88	0,04	0,03	0,00
Am-241	2,4	20,59	17,07	0,82
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Plutonio				**24**
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Pu-239 + Pu-240				**116**
Relación de actividades Alfa del Am-241 a la del Pu-241				**0,009**

Referencia (PNNL 2009)

Tabla 14.12: Composición isotópica del Plutonio de centrales nucleares de agua ligera 15 años después de su descarga del núcleo

Radionúclido	Composición isotópica en % en peso de Pu+Am	% de la actividad Alfa del Plutonio	% de la actividad Alfa total	% de la actividad total
Pu-238	1,26	71,04	36,20	3,33
Pu-239	56,62	11,57	5,90	0,54
Pu-240	23,18	17,33	8,83	0,81
Pu-241	5,69	-	-	90,81
Pu-242	4,73	0,06	0,03	0,00
Am-241	8,52	96,21	49,03	4,50
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Plutonio				**19**
Relación de actividades Alfa del Pu-241 a la total del Pu-239 + Pu-240				**67**
Relación de actividades Alfa del Am-241 a la del Pu-241				**0,050**

Referencia (OCDE 1989)

14.2 Anexo 2 - Ajuste de datos

Normalmente, en el marco de un programa de vigilancia especial, las medidas de bioanálisis para la estimación de una incorporación consistirán en un conjunto de datos procedentes de diferentes medidas realizadas en diferentes momentos e incluso empleando diferentes técnicas de medida, por ejemplo, medidas directas e indirectas.

Para la determinación de la mejor estimación de una única incorporación, cuando se conoce el momento de la incorporación, es necesario determinar en primer lugar los valores de la función de retención o de excreción, $m(t_i)$ por unidad de incorporación. Es entonces cuando se podrá proceder a determinar la mejor estimación de la incorporación I, de forma tal que el producto de $I \cdot m(t_i)$ sea el mejor ajuste a los datos de las medidas (t_i, M_i). En los casos en los que se disponga de varios tipos de medidas de bioanálisis se recomienda evaluar la incorporación y la dosis ajustando simultáneamente los valores que predicen los modelos con los diferentes tipos de medidas (***Sección 5.3***). Por ejemplo, si se dispone de datos procedentes de orina y heces, la incorporación se evaluará ajustando los valores estimados a ambos conjuntos de datos simultáneamente.

Los dos métodos más comúnmente empleados para el ajuste de datos son el de máxima probabilidad y el del enfoque Bayesiana. Sin embargo, en esta ***Guía*** este último no se considera y el método que se recomienda es el de máxima probabilidad (***Sección 5.3***). Como la función de probabilidad es la magnitud estadística central de este método, se aborda en detalle en este documento.

En este apartado se tratan los siguientes temas:

- Función de probabilidad
- Función de probabilidad para medidas “menores que”
- Método de máxima probabilidad

En los siguientes apartados se supone que ha ocurrido una única incorporación en un momento conocido y también se supone que no ha habido incorporaciones anteriores. Sin embargo, la última sección aborda la forma en que el método de la máxima verosimilitud puede extenderse para tratar con incorporaciones previas.

14.2.1 Función de probabilidad

La función de probabilidad es una magnitud estadística fundamental definida por:

$$\boldsymbol{L_i(I) = P(M_i|I)} \quad (14.1)$$

Donde $\boldsymbol{P(M_i|I)dM_i}$ es la probabilidad de observar un valor medido M_i en el intervalo entre M_i y $M_i + dM_i$, siendo I el valor verdadero de la incorporación.

Como ejemplo, esta probabilidad $\boldsymbol{P(M_i|I)}$ puede venir dada por una distribución log-normal:

$$L_i(I) = \frac{1}{M_i ln\,(SF_i)\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{[ln(M_i) - ln\,(I.m(t_i))]^2}{2[ln\,(SF_i)]^2}\right] \qquad (14.2)$$

Donde SF_i es la desviación geométrica estándar.

El significado de $L_i(I)$ es que si la incorporación fuera de hecho I y se pudieran repetir hipotéticamente un gran número de medidas en un mismo momento t_i, entonces la distribución de los resultados de las medidas estaría descrita por $L_i(I)$. La probabilidad de que el resultado de una medida se encuentre en el intervalo M_i y $M_i + dM_i$ será entonces $P(M_i|I)dM_i$. La función de probabilidad se puede por tanto determinar por medidas si el valor verdadero de la medida permanece relativamente constante con el tiempo [*Moss et al. 1969*].

Cuando se tienen n medidas independientes, la función de probabilidad combinada será el producto de las funciones de probabilidad para las medidas individuales:

$$L_i(I) = \prod_{i=1}^{n} L_i(I) \qquad (14.3)$$

Así, $L(I)$ está asociada con la probabilidad de observar todos los datos de las medidas dada la incorporación.

En la práctica, el contaje se convierte a actividad mediante un factor de normalización (o calibración), C_{rn}. Una situación importante es cuando C_{rn} tiene asociada una gran incertidumbre que se supone que sigue una distribución log-normal con una desviación geométrica estándar SF_B. Tal y como se describió en la sección 4.2, existen dos contribuciones a la incertidumbre total de la actividad:

- Incertidumbre asociada a la estadística de contaje, descrita mediante la estadística de Poisson (Incertidumbre ***Tipo A***).
- Incertidumbre de normalización, más subjetiva (Incertidumbre ***Tipo B***)

Miller et al. (2002) da la función exacta de probabilidad para medidas relacionadas con contajes. La función describe incertidumbres debidas a estadísticas de contaje (***Tipo A***) con una distribución de ***Poisson*** mientras que el resto de incertidumbres (***Tipo B***) se describen con una única distribución logarítmico-normal. La función exacta de probabilidad se recomienda para casos especiales con una baja tasa de contaje. Sin embargo, para casos en los que el número de cuentas es relativamente elevado (y los errores ***tipo A*** son relativamente pequeños) se pueden realizar las siguientes simplificaciones.

Cuando el número de cuentas es suficientemente grande (mayor que unas 10 cuentas con un fondo bajo), la aproximación normal de la función de probabilidad de ***Poisson*** es aproximadamente log-normal, ya que la distribución normal y log-normal se aproximan una a otra cuando la incertidumbre tiende a cero (*Miller 2007*).

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{A_i}} exp\left[-\frac{(M_i - I.m(t_i))^2}{2\sigma_{A_i}^2}\right] \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2\pi}M_i ln\,(SF_{A_i})} exp\left[-\frac{[ln(M_i) - ln\,(I.m(t_i))]^2}{2\left[ln\,(SF_{A_i})\right]^2}\right]$$

Donde

$$ln(SF_{A_i}) = \frac{\sigma_{A_i}}{M_i}$$

La convolución de esta distribución logarítmico-normal con la distribución logarítmico-normal de C_{rn} (teniendo una desviación geométrica estándar de SF_B) conduce a esta otra distribución logarítmica normal:

$$L_i(I) = \frac{1}{M_i ln\,(SF_i)\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{[ln(M_i) - ln\,(I.m(t_i))]^2}{2[ln\,(SF_i)]^2}\right] \qquad (14.4)$$

Donde SF_i es el factor de dispersión total, dado por la expresión siguiente:

$$SF_i = exp\sqrt{\left[ln(SF_{A_i})\right]^2 + \left[ln(SF_{B_i})\right]^2} \qquad (14.5)$$

Esta es la función de probabilidad recomendada por la ***Guía IDEAS*** (***Sección 4.2***) y es aplicable en los casos en los que el número de cuentas es relativamente grande (por ejemplo cuando $SF_A < 1.4$). *Miller (2007)* recomienda esta aproximación log-normal si el cociente $ln(SF_A)/ln(SF_B)$ es menor que ***1/3***. SI esta desigualdad no se satisface, entonces *Miller (2007)* considera que debe utilizarse la expresión exacta de la función de probabilidad o bien una de las expresiones alternativas que el describe.

La distribución logarítmico-normal posee una importante propiedad cualitativa, y es que ***I = 0*** siempre tiene una probabilidad ***cero***. La función exacta de probabilidad, por otro lado, a menudo tiene un valor significativo no nulo en ***I = 0***, y en ocasiones el máximo de la función tiene lugar en este punto. La ecuación (***14.4***) no debe ser aplicada cuando el número de cuentas es bajo, ya que puede inducir a la estimación de una incorporación pequeña o incluso nula en la interpretación de los datos.

14.2.2 Función de probabilidad para medidas "menores que"

El método de máxima probabilidad se puede aplicar para estimar incorporaciones a partir de conjuntos de datos de valores positivos (por ejemplo, valores por encima del umbral de decisión ***UD***) y valores reportados como menores del límite de detección (***LD***). La función de probabilidad para medidas "***menores que***" da la probabilidad de que una medida sea reportada como menor de ***LD*** dada una incorporación verdadera de magnitud ***I***.

El límite de detección ***LD*** es un valor calculado ***a priori*** que especifica la actividad mínima que se puede detectar por un procedimiento específico de medida [*Health Physiscs Society (1996)*]. Una magnitud asociada al ***LD*** es el umbral de decisión, ***UD***, también denominado nivel crítico o nivel de decisión. Si el valor medido se encuentra por debajo del ***UD***, se puede decir que la magnitud medida se debe únicamente a la contribución del fondo, y por tanto el valor se reporta como menor al ***LD***. En estos casos la función de probabilidad viene dada como la integral de la función de probabilidad:

$$L_j(I) = \int_{M=M_{min}}^{UD_j} P(M|I)dM \qquad (14.6)$$

Dónde:

P(M|I)dM es la probabilidad de observar un valor de la medida entre ***M*** y ***M+ dM*** dada una incorporación cuyo valor verdadero es ***I***.

$\boldsymbol{UD_j}$ es el umbral de decisión para una medida llevada a cabo en el momento $\boldsymbol{t_j}$.

$\boldsymbol{M_{min}}$ es el límite inferior de integración y su valor depende de la elección de la distribución de probabilidad. Por ejemplo, si la distribución de probabilidad es logarítmico-normal $\boldsymbol{M_{min} = 0}$, pero si es normal $\boldsymbol{M_{min} = -\infty}$

Dada una incorporación verdadera ***I***, $\boldsymbol{L_j(I)}$ es la probabilidad de que el valor medido se encuentre por debajo del umbral de decisión y por tanto se reporte como ***< LD***.

Si un conjunto de datos de medidas independientes consiste en ***n*** datos que no se reportan como menores del ***LD*** (y por tanto, mayores al ***UD***) y ***p*** datos reportados como menores de límite de detección ***LD***, la función combinada de probabilidad para el conjunto de datos viene dada por:

$$\boldsymbol{L(I) = \left(\prod_{i=1}^{n} P(M_i|I)\right)\left[\prod_{j=1}^{p}\int_{M=M_{min}}^{DT_j} P(M_i|I)dM\right]} \qquad (14.7)$$

Así, ***L(I)*** está asociada con la probabilidad de observar el conjunto de datos dada una incorporación.

Por ejemplo, si se supone que las medidas están distribuidas log-normal (dada por la ecuación ***14.4***), el último paréntesis de la ecuación anterior ***14.7***, que da la probabilidad de observar ***p*** medidas reportadas como menores del límite de detección ***LD***, vendrá dado por:

$$\boldsymbol{\prod_{j=1}^{p}\int_{M=0}^{DT_j}\frac{1}{M\ ln\ (SF_j)\sqrt{2\pi}}exp\left[-\frac{\left[ln(M) - ln\ (I.m(t_j))\right]^2}{2\left[ln\ (SF_j\right]^2}\right]dM}$$

Donde $\boldsymbol{SF_j}$ es el factor total de dispersión (Apartado 4.2)

14.2.3 Método de la máxima probabilidad

El método de la máxima probabilidad proporciona el "mejor ajuste" del valor ***I*** de la incorporación y es aquel que maximiza la función de probabilidad indicada por la ecuación ***14.3*** o por la ecuación ***14.7***. En general el máximo se debe determinar numéricamente y ello se puede hacer dando diferentes valores a ***I*** desde ***0*** hasta un valor máximo y viendo con qué valor de ***I*** se obtiene el máximo de la función de probabilidad o empleando un método numérico más sofisticado.

Si la función de probabilidad para todas las medidas individuales viene dada por una distribución log-normal (como la indicada por la ecuación ***14.4***) y ninguna de las medidas se ha reportado como menor que el límite de detección (***<LD***), entonces la función combinada de probabilidad se obtiene sustituyendo la ecuación ***14.4*** en la ***14.3***.

$$\boldsymbol{L(I) = K.exp\left[-\frac{\chi^2(I)}{2}\right]} \qquad (14.8)$$

Siendo:

$$\boldsymbol{K = \prod_{i=1}^{n} \frac{1}{\sqrt{2\pi}.M_i.\ln(SF_i)}}$$

y

$$\boldsymbol{\chi^2(I) = \sum_{i=1}^{n} \frac{[ln(M_i) - ln(I.m(t_i))]^2}{[ln(SF_i)]^2}}$$

El máximo de la función de probabilidad sucede cuando $\boldsymbol{\chi^2(I)}$ es mínimo. Para minimizar $\boldsymbol{\chi^2(I)}$ se halla la derivada de su expresión con respecto a ***ln(I)*** y se iguala esa derivada a cero. Agrupando términos se obtiene que:

$$\boldsymbol{ln(I) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{ln\left(\frac{M_i}{m(t_i)}\right)}{[ln(SF_i]^2}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{[ln(SF_i]^2}}}$$

Pero como $\boldsymbol{I_i = M_i/m(t_i)}$ donde $\boldsymbol{I_i}$ es la incorporación calculada de la medida ***i***, se obtiene finalmente que:

$$\boldsymbol{ln(I) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{ln(I_i)}{[ln(SF_i]^2}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{[ln(SF_i]^2}}} \qquad (14.9)$$

Por tanto, ***ln(I)*** es la media ponderada de $\boldsymbol{ln(I_i)}$, de los logaritmos de las diferentes estimaciones de la incorporación obtenidas de cada medida individual de bioanálisis. EL uso de diferentes métodos de promediar las estimaciones individuales de la incorporación $\boldsymbol{I_i}$ para obtener el "***mejor ajuste***" se basan en el método de la máxima probabilidad.

Por ejemplo, si se consideran datos de medidas de orina, los factores de dispersión ***SF*** están dominados por las incertidumbres de ***Tipo B*** (incertidumbres diferentes de las procedentes del contaje, como los errores de calibración u otros errores que provienen de la variabilidad biológica de las micciones o de los procedimientos de muestreo). En este caso se puede considerar que todos los valores ***SF*** son constantes e iguales para cada medida de orina, es decir, $\boldsymbol{SF_i = SF_o = constante}$. Por tanto la ecuación ***14.9*** de la mejor estimación de la incorporación se reduce a:

$$\boldsymbol{ln(I) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} ln(I_i) = ln\left[\left(\prod_{i=1}^{n} I_i\right)^{1/n}\right]}$$

O lo que es lo mismo

$$\boldsymbol{I = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} I_i}}$$

Por lo tanto, cuando los valores de ***SF*** de las medidas individuales se pueden considerar todos iguales, entonces la mejor estimación de la incorporación viene dada por la media geométrica de las estimaciones individuales de la incorporación.

La ecuación ***14.9*** también se puede aplicar en los casos en los que se dispone de conjunto de datos de diferentes técnicas de vigilancia. Por ejemplo, si se dispone de n_o datos de orina y de n_h de heces y los factores de dispersión para orina y heces son respectivamente SF_o y SF_h, la ecuación ***14.9*** se convierte en esta otra:

$$ln(I) = \frac{\sum_{i=1}^{n_o} \frac{ln\,(I_i)}{[ln\,(SF_o)]^2} + \sum_{j=1}^{n_h} \frac{ln\,(j)}{[ln\,(SF_h)]^2}}{\sum_{i=1}^{n_o} \frac{1}{[ln\,(SF_o)]^2} + \sum_{j=1}^{n_h} \frac{1}{[ln\,(SF_h)]^2}}$$

O de una forma más sencilla

$$ln(I) = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{n_o} ln(I_i)}{[ln(SF_o)]^2} + \frac{\sum_{j=1}^{n_h} ln(I_j)}{[ln(SF_h)]^2}}{\frac{n_o}{[ln\,(SF_o)]^2} + \frac{n_h}{[ln\,(SF_h)]^2}}$$

Donde

I_i se refiere las estimaciones individuales de la incorporación obtenidas de los datos de orina e I_j a las estimaciones individuales de la incorporación obtenidas de los datos de heces. Se ha supuesto que las incertidumbres de ***Tipo B*** dominan y por lo tanto cada valor de SF_i de las medidas de orina se supone constante e igual a SF_o y lo mismo para las medidas de heces, cada SF_j se supone constante e igual a SF_h.

14.2.4 Extensión a múltiples incorporaciones

Cualquier incorporación previa que tenga influencia sobre el resultado de la medida real, debe ser tenida en cuenta. ***IDEAS*** propone calcular el valor neto de la actividad del radionucleido, N_i, restando las contribuciones de las anteriores incorporaciones P_i del valor de la medida ($N_i = M_i - P_i$). Por simplicidad, ignorando la incertidumbre de P_i, se puede aplicar la ecuación ***14.9*** para determinar la mejor estimación de la incorporación con:

$$I_i = \frac{N_i}{m(t_i)}$$

Al aplicar la ecuación ***14.9*** a estos casos se está suponiendo que los valores netos de la actividad, I_i, están distribuidos logarítmico-normal con un factor ***SF*** de dispersión dado. Sin embargo la distribución resultante de los valores netos no es log-normal puesto que al restar un valor P_i de otros valores M_i distribuidos log-normal no se obtiene una nueva distribución log-normal.

Un enfoque alternativo es ajustar simultáneamente las incorporaciones previas así como la incorporación de interés a todos los datos utilizando el método de la máxima probabilidad. La metodología de la máxima probabilidad puede fácilmente extenderse para tratar varias incorporaciones. Para ***k*** incorporaciones la

función de probabilidad tiene ***k*** dimensiones y el problema consiste entonces en encontrar ***k*** valores de ***I*** (valores de la incorporación) que la maximicen. Así por ejemplo, la ecuación ***14.4*** se convierte en esta otra:

$$L_i(I) = \frac{1}{M_i ln\,(SF_i)\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{\left[ln(M_i) - \left\{ln\left(I_1.m_1(t_i-\tau_1)\right) + ln\left(I_2.m_2(t_i-\tau_2)\right) + \cdots + ln\left(I_k.m_k(t_i-\tau_k)\right)\right\}\right]^2}{2[ln\,(SF_i)]^2}\right]$$

Donde τ_1, τ_2,..... τ_k son los momentos de cada incorporación.

14.3 Anexo 3 – Prueba estadística de autocorrelación

Las incorporaciones, dosis equivalentes y efectivas se calculan con modelos biocinéticos y dosimétricos.

La prueba estadística de autocorrelación ha sido considerada por *Puncher et al. (2007)* como una herramienta para evaluar la "***bondad del ajuste***" tras ajustar los datos de las medidas con los modelos biocinéticos. Esta prueba estadística considerada por *Puncher et al. (2007) es el llamado estadístico de autocorrelación lag-1 y* está definida de la siguiente forma:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} R_i R_{i+1}}{\sum_{i=1}^{n} R_i^2} \qquad \text{con } -1 < \rho < 1 \quad (14.12)$$

En la fórmula anterior, R_i es el residuo i-ésimo de la secuencia de n residuos (con $n \geq 6$). Si el procedimiento de ajuste supone que las incertidumbres de las medidas están distribuidas de forma logarítmico-normal, con el mismo factor de dispersión ***SF*** para todas las medidas, entonces cada residuo R_i se puede calcular como sigue:

$$R_i = \frac{\ln(M_i) - \ln(I.m(t_i))}{ln(SF)} \quad (14.13)$$

Donde M_i es la medida i-ésima realizada un tiempo t_i después de la incorporación.

I es la incorporación estimada.

$m(t_i)$ es la función de retención o de excreción un tiempo t_i después de la incorporación.

SF es el factor de dispersión definido como la desviación estándar geométrica de la distribución log-normal.

Hay algunas particularidades con la ecuación de ρ.

- El numerador proporciona una medida de "***no aleatoriedad***"
- El numerador está normalizado por la suma de los cuadrados de los residuos (χ^2). Esto tiene el efecto de que el valor de ρ es completamente independiente de la magnitud de la varianza y de la incertidumbre supuesta.
- En condiciones de total aleatoriedad se podría esperar que $\rho = 0$. Sin embargo como la secuencia se hace cada vez menos aleatoria, ρ se aproxima a la unidad. Por tanto, valores de ρ cercanos a la unidad son indicativos de un ajuste pobre o malo.

La fórmula anterior de ρ no es aplicable cuando los datos son menores que el límite de detección (***LD***).

El valor calculado de ρ se compara con su distribución nula correspondiente a la hipótesis nula de que no hay correlación entre pares de elementos consecutivos en la serie de residuos. Cuando el numero n de datos es mayor o igual a 6 la distribución nula de ρ puede aproximarse por una distribución normal. La media μ y la desviación típica σ de esta distribución son:

$$\mu = -\frac{1}{n} \ (14.14) \quad \sigma = \frac{n-2}{n\sqrt{n-1}} \ (14.15)$$

Por lo tanto, los ***p-valores*** pueden obtenerse fácilmente de tablas estadísticas. Las simulaciones de Monte Carlo llevadas a cabo por *Puncher et al., 2007*, indican que el estadístico ρ debe aplicarse utilizando la prueba de una sola cola. El ajuste se considera no adecuado cuando la probabilidad de que ρ sea mayor que ρ_0 es menor que un nivel de significancia especificado, por ejemplo, se puede fijar un valor crítico al ***95%*** en $\mu + 1{,}64\sigma$ en cuyo caso el ajuste se rechaza si $\rho_0 > \mu + 1{,}64\sigma$ en donde ρ_0 es el coeficiente calculado de autocorrelación.

En los casos en los que se disponga de conjuntos de datos procedentes de diferentes técnicas de bio-análisis, es posible extender la prueba de autocorrelación *(Gregoratto, 2013)* definiendo el estadístico ρ de para toda la secuencia de los ***n*** residuos obtenidos juntando los conjuntos de datos de la siguiente manera.

Por ejemplo, para el caso de disponer de dos conjuntos de datos, por ejemplo de medidas de orina y heces, $n = n_o + n_h$, donde n_o es el número de datos de medidas de actividad en orina y n_h el de heces. El coeficiente de autocorrelación se define como sigue:

$$\boldsymbol{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^{n_o-1} R_{o,1}R_{o,i+1} + \sum_{i=1}^{n_h-1} R_{h,1}R_{h,i+1}}{\sum_{i=1}^{n_o} R_{o,1}^2 + \sum_{i=1}^{n_h} R_{h,1}^2} = \boldsymbol{\rho_o}\frac{\chi_o^2}{\chi^2} + \boldsymbol{\rho_h}\frac{\chi_h^2}{\chi^2} \quad (14.16)$$

En donde ρ_o y ρ_h son los coeficientes de autocorrelación de cada conjunto de datos y χ_o^2 y χ_h^2 son valores de chi-cuadrado de cada conjunto de datos siendo $\chi^2 = \chi_h^2 + \chi_o^2$ el valor total de chi-cuadrado.

Cuando el número total de datos ***n*** es mayor o igual a ***6***, el estadístico ρ sigue aproximadamente una distribución normal con una media y una desviación típica dadas por:

$$\boldsymbol{\mu} = -\frac{1}{n}\left(\frac{n-n_{bio}}{n-1}\right) \quad (14.17) \qquad \boldsymbol{\sigma} = \frac{n-2}{n\sqrt{n-1}}\sqrt{\frac{n-n_{bio}}{n-1}} \quad (14.18)$$

Donde n_{bio} es el número de datos de bio-análisis disponibles (Cuando n_{bio} es igual a ***1*** las ecuaciones 14.17 y 14.18 se convierten respectivamente en las ecuaciones 14.14 y 14.15). Sin embargo, para detectar correlaciones en los conjuntos de datos obtenidos a lo largo del tiempo en cualquiera de las técnicas de bio-análisis disponibles, es recomendable al menos disponer de un mínimo de ***4*** valores para cada conjunto de datos (*Gregoratto, 2013*).

La mayor fortaleza del estadístico ρ, aparte de su objetividad, es que es insensible a la varianza supuesta de los datos de bio-análisis. Esto está en absoluto contraste con la prueba del chi-cuadradoχ^2 que es totalmente dependiente de al varianza de los datos de partida. Es por tanto, claro que el estadístico ρ se puede utilizar para cuantificar el ajuste visual. La pregunta de si debe utilizarse para sustituir a χ^2 no es fácil de responder. Se pude argüir que los dos estadísticos miden cosas diferentes y son independientes, por ejemplo, el estadístico χ^2 mide la desviación total de los datos ajustados mientras que el estadístico ρ mide la no aleatoriedad en la serie de residuos una vez ajustados los datos. Por ejemplo, si una de las pruebas rechaza un ajuste y la otra no, entonces el modelo utilizado debe descartarse. Esto trae a colación, por tanto, la pregunta de la significancia de estas pruebas estadísticas. Si, por ejemplo, hubiera 20 pruebas independientes, todas ellas realizadas al nivel de confianza del 95%, uno podría esperar que en promedio, al menos una de esas pruebas rechazara un modelo correcto. Por tanto, la significancia combinada de ambas pruebas debe tenerse en consideración si ambas se utilizan simultáneamente.

Para evitar este problema, podría sugerirse que el estadístico ρ sustituyera tanto a χ^2 como al ajuste visual. Un argumento a favor de este enfoque procede de la observación del hecho de que si el modelo es incorrecto, el estadístico ρ es siempre mejor en el rechazo, independientemente de cualquier suposición de errores. Sin embargo, una desventaja del estadístico ρ es que no se puede aplicar cuando el número de valores en cada conjunto de datos es menor que cuatro. En estos casos hay que buscar pruebas alternativas.

Una ventaja de aplicar ambos estadísticos es que puede haber situaciones en que la prueba ρ refute la hipótesis nula (ausencia de correlación) y la prueba χ^2 no. Estas situaciones indican que el error sobre las medidas puede haber sido sobreestimado y se debería, por tanto, inferir un error más realista del conjunto de medidas.

14.4 Anexo 4 – Evaluación manual del *valor-p*

Para facilitar la evaluación del valor de probabilidad:

$$\boldsymbol{P}(\chi^2 > \chi_0^2) = \boldsymbol{P}(\tilde{\chi}^2 > \tilde{\chi}_0^2)$$

Los valores de esa probabilidad para un valor observado de chi-cuadrado reducido se indican en la tabla ***14.13***.

El p-valor corresponde a la siguiente integral:

$$\boldsymbol{p - valor} = \frac{2}{2^{d/2}\Gamma(d/2)} \int_{\chi_0}^{\infty} x^{d-1} e^{-x^2/2} dx$$

El uso de la tabla ***14.13*** es como sigue:

Primero se calcula el valor del chi-cuadrado reducido:

$$\tilde{\chi}_0^2 = \frac{\chi_0^2}{n_d}$$

(donde $n_d = n-1$ es el número de grados de libertad siendo ***n*** el número total de medidas utilizadas)

A continuación se busca en la tabla ***14.13*** ese valor del chi-cuadrado reducido en la línea correspondiente a n_d.

Por ejemplo, si se ha observado un valor del chi-cuadrado reducido de 13 con 10 grados de libertad, primero se calcula $\tilde{\chi}_0^2$ **= 13/10 = 1,3**. Para 10 grados de libertad la probabilidad para ese valor de 1,3 de chi-cuadrado reducido es de 0,224 y puesto que este valor es mayor de 0,05, el ajuste no se rechaza.

Alternativamente, el ***p-valor*** puede evaluarse mediante la función ***DISTTR.CHICUAD.CD***(x, grados de libertad) de EXCEL en donde x es el valor observado de chi-cuadrado y siendo los grados de libertad = ***n-1***, con ***n*** el número de medidas utilizadas.

Tabla 14.13

Valores de la probabilidad asociada con $\boldsymbol{P}(\tilde{\chi}^2 > \tilde{\chi}_0^2)$

| | VALOR OBSERVADO DEL CHI-CUADRADO REDUCIDO | | |

15. Referencias

Al-Arifi 2006 — Al-Arifi, M.N., Alkarfy, K.M., Al-Suwayeh, S.A., Aleissa, K.A., Shabana, E.I., Al-Dhuwaili, A.A. and Al-Hassan, M.I. "*Levels of ^{210}Po in blood, urine and hair of some Saudi smokers.*" J. Radioanal. Nucl. Chem. **269**: 115-118 (2006).

Al-Jundi 2004 — Al-Jundi, J., Werner, E., Roth, P., Höllriegl, V., Wendler, I. and Schramel, P.. *Thorium and uranium contents in human urine: influence of age and residential area*. J. Environ. Radioactivity **71**: 61-70 (2004).

ANSI 1996 — Health Physics Society Working Group (1996). An American National Standard – *Performance criteria for radiobioassay*. (Health Physics Society) HPS N13.30-1996.

Ansoborlo 1995 — Ansoborlo, E., Henge Napoli, M.H., Roy, M., Pihet, P. and Rannou, A. (1995). "*Implementation of the new ICRP respiratory tract model: Example of a potential exposure to an industrial oxide UO_2.*" Bul. of Radiat. Protection 18(1 & 2): 1-7.

Audi 2003 — Audi G., Wapstra, A.H. and Thibault C. "*The AME2003 atomic mass evaluation – (II). Tables, graphs and references*." Nuclear Physics A 729: 337-676.

Azeredo 1991 — Azeredo, A.M.G.F. and Lipsztein, J.L. "*^{210}Po Excretion in Urine: A Comparison of an Occupational Exposed Group and a Control*." Radiat. Prot. Dosim. **36**(1): 51-54 (1991).

Bailey 2003 — Bailey BR, Eckerman KF, Townsend LW. *An analysis of a puncture wound case with medical intervention*. Radiat. Prot. Dosim. 105:509-512 (2003).

Bale 1975 — Bale, W.F., Helmkamp, R.W., Hrynyszyn, V. and Contreras, M.A.. "*The Determination of ^{210}Po in Urine*." Health Phys. **29**(5): 663-671 (1975).

Berglund 2011 — Berglund, M. and Wieser, M.E. (2011). "*Isotopic compositions of the elements 2009 (IUPAC Technical Report)*." Pure. Appl. Chem. 83(2): 397-410.

Berkovski 2000 — Berkovski, V., *Application of the Internal Dosimetry Support System for Interpretation of In Vivo and Bioassay Measurements*. Radiat. Prot. Dosim. 89: 271-274 (2000).

Berkovski 2002 — Berkovski, V., *IMIE Individual Monitoring of the Internal Exposure Computer Code.* User's Guide 8.8.1, Kiev, 2002.

BIPM et al. — 2010 BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML (2010). *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. JGCM 100:2008. First edition 2008, Corrected version 2010.

Birchall 2003 — Birchall A., Puncher M., James A.C., Marsh J.W., Jarvis N.S., Peace M.S., Davis K. and King D.J. *IMBA Expert^{TM}: Internal Dosimetry Made Simple*. Radiat. Prot. Dosim. 105: 421-425 (2003).

Bull 2005 — Bull, R. W. Health Physics and Consulting Division, RWE NUKEM, Harwell, Didcot, Oxon, OX11 0QJ, UK. *Private communication* (2005).

Castellani 2004 — Castellani C.-M., Luciani A., Andrasi A., Bailey M., Marsh J., Puncher M., Berkovski V., Blanchardon E., Jourdain J.-R., Doerfel H., Hurtgen C. and LeGuen B.: *IDEAS Work Package 3, Evaluation of Incorporation Cases*. RT/2004/2/ION, ENEA (2004).

Castellani 2010 — C.M Castellani et al. "*Results of internal dose assessment intercomparison exercise after the 2009 EURADS/IAEA Training Course*". Report ENEA RT/2010/13/ENEA, ENEA Rome, April 2010.

CONRAD 2008 — CONRAD TASKS 5.1 & 5.5: UNCERTAINTY STUDIES, UPDATE OF IDEAS GUIDELINES AND DATABASES. Deliverable 5.1, Final report, February 2008.

Cox and Harris, 2004 — Cox, M.G. and Harris, P.M. (2004) Best Practice Guide No. 6. *Uncertainty evaluation.* Technical report, National Physical Laboratory, Teddington, UK. Available for download from the SSfM website at www.npl.co.uk.

Dalheimer 1994 — Dalheimer, A. and Henrichs, K. "*Monitoring of Workers Occupationally Exposed to Thorium in Germany*." Radiat. Prot. Dosim. **53**(1-4): 207-209 (1994).

Dang 1992 — Dang, H.S., Pullat, V.R. and Pilla‹, K.C. "*Determining the normal concentration of uranium in urine and application of the data to its biokinetics*." Health Phys. **62**(6): 562-566 (1992).

De Boeck 1971 — De Boeck, R., Adams, F. and Hoste, J. "*The Determination of ^{210}Po in Urine*." Health Phys. 20(4): 403-407 (1971).

Doerfel 2000 — H. Doerfel, A. Andrasi, M.R. Bailey, A. Birchall, C.-M. Castellani, C. Hurtgen, N. Jarvis, L. Johansson, B. LeGuen and G. Tarroni: *Third European Intercomparison Exercise on Internal Dose Assessment*. (Results of a Research Programme in the Framework of the EULEP/EURADOS Action Group „Derivation of Parameter Values for Application to the New Respiratory Tract for Occupational Exposure" 1997-

1999), Research Center Karlsruhe, Research Report FZKA 6457 (Karlsruhe, April 2000), ISSN 0947-8620 (http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA6457.pdf)

Doerfel 2006 — Doerfel H., Andrasi A., Bailey M., Berkovski V., Blanchardon E., Castellani C.- M., Hurtgen C., Le Guen B., Malatova I., Marsh J., Stather J. (2006) *General guidelines for the assessment of internal dose from monitoring data.* (project IDEAS – EU contract n° FIKR-CT2001-00160). Report FZKA 7243. Research Center Karlsruhe. Available at http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7243.pdf

DOE 1998 — U.S. Department of Energy (DOE). 1998. *Guide of Good Practices for Occupational Radiological Protection in Plutonium Facilities*. Washington, D.C DOE-STD-1128-98. Available at http://www.hss.doe.gov/nuclearsafety/techstds/archive.html

Dorrian 2005 — Dorrian M D, Bailey M R. *Particle size distributions of radioactive aerosols measured in workplaces*. Radiat. Prot. Dosim. 60(2) 119-133 (1995).

Etherington 2006 G. — Etherington, et al. *Uncertainty in doses from intakes of radionuclides assessed from monitoring measurements*. Radiat. Prot. Dosim. 121(1) 40-51 2006.

Etherington 2004 — G. Etherington et al. *Optimisation of monitoring for Internal Exposure* (OMINEX). Report NRPB-W60. Health Protection Agency, Chilton, Didcot, Oxon, OX11 ORQ, UK. (2004).

Fenzi 1986 — Fenzi, A. *Pre-operational Survey of a U Mine Near Val Vedello, Italy*. Health Phys. **51**(2): 197-205 (1986).

Fisher 1983 — Fisher, D.R., Jackson, P.O., Brodaczynski, G.G. and Scherpelz, R.I. "*Levels of ^{234}U, ^{238}U and ^{230}Th in excreta of uranium mill crushermen*." Health Phys. **45**(3): 617-629 (1983).

Grappin 2006 — Grappin L, Bérard P, Beau P, Carbone L, Castagnet X, Courtay C, Le Goff J-P, Ménétrier F, Neron M-O, Piechowski J. *Exposition aux actinides: bilan des injections de Ca-DTPA dans les centres CEA-COGEMA*. Gif-sur-Yvette: CEA; Report CEA-R-6097, (2006).

Grappin 2007 — Grappin L, Berard P, Menetrier F, Carbone L, Courtay C, Castagnet X, Le Goff J.-P, Neron M.-O, Piechowski J. *Treatment of actinide exposures: A review of Ca-DTPA injections inside CEA-COGEMA plants.* Radiat. Prot. Dosim. 127 (1- 4) 435-439 (2007).

Gregoratto 2010 — Gregoratto, D., Bailey, MR and Marsh JW, *Modelling particle retention in the alveolar-interstitial region of the human lungs*. J. Radiol. Prot. 30 pp.491-512 (2010).

Gregoratto 2013 — Gregoratto, D. and Marsh JW, *Note on the autocorrelation coefficient as a test statistic*, to be submitted to Radiation Protection Dosimetry.

Guilmette 2003 — R. A. Guilmette and P. Durbin *Scientific Basis for the Development of Biokinetic Models for Radionuclide-contaminated Wounds*. Radiation Protection Dosimetry Vol. 105, N. 1-4, pp. 213-218, 2003.

Hall 1978 — Hall RM, Poda GA, Fleming RR, Smith JA. *A mathematical model for estimation of plutonium in the human body from urine data influenced by DTPA therapy*. Health Physics 34: 419-431 (1978).

Helmkamp 1979 — Helmkamp, R.W., Bale, W.F. and Hrynyszyn, V.. "*The determination of ^{210}Po and 210Bi in human urine by direct extraction on nickel*." Int. J. Appl. Radiat. Isot. **30**(4): 237-246 (1979).

Hölgye 1969 — Hölgye, Z.. "*Estimation of 210Po in urine by combined deposition to nickel and silver disc*." Pracov. Lék. **21**: 62-66 (1969). (in Czech)

Hölgye 2009 — Hölgye, Z. and Straková, H.. "*Excretion rate of 210Po in urine of general population (a review)*." Radioprotection **44**(3): 345-353 (2009).

Hunt 2004 — Hunt, G.J. and Rumney, H.S. "*The Human Gut Transfer of Environmental Polonium-210*". 11th International Congress of IRPA., Madrid, Spain- 23 – 28 May 2004.

Hunt 2007 — Hunt, G.J. and Rumney, H.S.. "*The human alimentary tract transfer and body retention of environmental polonium-210*." J. Radiol. Prot. **27**: 405-426 (2007).

Hurtgen 2001 — Hurtgen, C. "*Natural radioactivity in bioassay by alpha-spectrometry measurements*." J. Radioanal. Nucl. Chem. 248(2): 477-482 (2001).

Hurtgen 2003 — Hurtgen C.,Cossonet C. *A survey of uncertainty in bioassay measurements carried out within the OMINEX project*. Radiat. Prot. Dosim. 105(1-4) 375- 378 (2003).

Hurtgen 2005 — Hurtgen C., Andrasi A., Bailey M.R., Birchall A., Blanchardon E., Berkovski V., Castellani C.-M., Cruz-Suarez R., Davis K., Doerfel H., LeGuen B., Malatova I., Marsh J. and Zeger J. *IDEAS/IAEA Intercomparison Exercise on Internal Dose Assessment*. Scientific Report SCK·CEN – BLG-1018. SCK·CEN, Mol, Belgium, October 2005 (http://publications.sckcen.be/dspace/bitstream/10038/257/1/blg1018_l.pdf).

Hurtgen 2007 Hurtgen, C. et al. *IDEAS internal contamination database: a compilation of published internal contamination cases. A tool for the internal dosimetry community*. Radiat. Prot. Dosim. 125(1-4) 520–522 (2007).

Hurtgen 2012 C. Hurtgen and J. L. Lipsztein *Personal communication*, 2012

IAEA 1996 International Atomic Energy Agency. (1996) *Direct Methods for Measuring Radionuclides in the Human Body*, Safety Series No. 114. IAEA, Vienna.

IAEA 1999 International Atomic Energy Agency, *Assessment of Occupational Exposure due to Intakes of Radionuclides*. Safety Guide no. RS-G-1.2 IAEA, Vienna (1999).

IAEA 2004 International Atomic Energy Agency, *Methods for Assessing Occupational Radiation Doses from Intakes of Radionuclides*. Safety Reports Series no. 37. IAEA, Vienna (2004).

ICRP 1975 International Commission on Radiological Protection. *Report of the Task Group on Reference Man.* ICRP Publication 23, Pergamon Press Oxford (UK) (1975).

ICRP 1979 International Commission on Radiological Protection. *Limits for the Intake of Radionuclides by Workers.* ICRP Publication 30, Part 1, Annals of the ICRP. 2 (3/4). (1979).

ICRP 1983 International Commission on Radiological Protection. *Radionuclide Transformations: Energy and Intensity of Emission.* ICRP Publication 38, Annals of the ICRP. Vol. 11-13 (1983).

ICRP 1989 International Commission on Radiological Protection. *Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1*. ICRP Publication 56, Part 1; Annals of the ICRP 20(2) (1989).

ICRP 1993 International Commission on Radiological Protection. *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intakes of Radionuclides: Part 2. Ingestion Dose Coefficients*. ICRP Publication 67, Annals of the ICRP. 23 (3/4) (1993).

ICRP 1994 International Commission on Radiological Protection. *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*. ICRP Publication 66, Annals of the ICRP. 24 (1-3) (1994).

ICRP 1994b International Commission on Radiological Protection. *Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers Replacement of ICRP Publication 61*. ICRP Publication 68, Annals of the ICRP. 24 (4) (1994).

ICRP 1995a International Commission on Radiological Protection. *Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by workers Replacement of ICRP Publication 61*. ICRP Publication 68, Annals of the ICRP. 24 (4).(1995).

ICRP 1995b International Commission on Radiological Protection. *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intakes of Radionuclides: Part 3. Ingestion Dose Coefficients*. ICRP Publication 69, Annals of the ICRP. 25 (1) (1995).

ICRP 1995c International Commission on Radiological Protection. *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intakes of Radionuclides: Part 4. Inhalation Dose Coefficients*. ICRP Publication 71, Annals of the ICRP. 25 (3- 4) (1995).

ICRP 1997 International Commission on Radiological Protection. *Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers*. ICRP Publication 78, Annals of the ICRP. 27 (3/4). (1998).

ICRP 2002a International Commission on Radiological Protection. *Basic Anatomical and Physiological data for Use in Radiological Protection.* ICRP Publication 89 Annals of the ICRP. 32 (3/4). (2002).

ICRP 2002b International Commission on Radiological Protection. *Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model.* ICRP Supporting Guidance 3. Annals of the ICRP. 32 (1-2). (2002).

ICRP 2006 International Commission on Radiological Protection. *Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection*. ICRP Publication 100 Annals of the ICRP. 36 (1/2). (2006).

ICRP 2008a International Commission on Radiological Protection. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 103, Annals of the ICRP. 37 (2-4). (2008).

ICRP 2008b International Commission on Radiological Protection. *Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations*. ICRP Publication 107, Annals of the ICRP. 38 (3) (2008).

ICRP 2009 International Commission on Radiological Protection. *Adult Reference Computational Phamtons*. ICRP Publication 110, Annals of the ICRP.39 (2) (2009).

ICRU 2003 ICRU Report 69 *Direct determination of the body content of radionuclides*. Journal of the ICRU, Vol. 3, No. 1, 2003.

ISO 1995 — *Guide to the Expression of Uuncertainty in Measurement (GUM)*. ISO international standard. International Organization for Standardization, Geneva, 1993 corrected reprint 1995.

ISO 2000 — *Determination of the detection limits and decision threshold for ionizingradiation measurement – Part 1: Fundamentals and application to counting measurements without the influence of ample treatment*. ISO international standard 11929-1:2000(E). International Organization for Standardization, Geneva, First Edition 1/7/2000.

ISO 2006 — *Radiation protection — Monitoring of workers occupationally exposed to a risk of internal contamination with radioactive material*. ISO international standard 20553:2006(E), International Organization for Standardization, Geneva, First Edition 15/4/2006.

ISO 2010a — *Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation. Fundamentals and application*. ISO international standard 11929:2010(E). International Organization for Standardization, Geneva, First Edition 1/3/2010.

ISO 2010b — *Radiation protection- Performance criteria for radiobioassay*. ISO international standard 28218:2010(E). International Organization for Standardization, Geneva, First Edition 1/10/2010.

ISO 2011 — *Radiation protection — Dose assessment for monitoring of workers for internal radiation exposure*. ISO international standard 27048:2011(E). International Organization for Standardization, Geneva, First Edition 15/1/2011.

Ishigure 2003 — N. Ishigure et. al. *Database of Calculated Values of Retention and Excretion for Members of the Public following Acute Intake of Radionuclides.* Rad. Prot. Dosim., 105 (1-4) 311-316 (2003).

Ishigure 2007 — N. Ishigure *Prediction of monitoring data for 239Pu accidentally injected via wound site based on the proposed NCRP wound model.* Rad. Prot. Dosim., 127 (1-4) 108-113 (2007).

Julião 1998 — Julião, L.M.Q.C. and Lipsztein, J.L. "*Background contribution to internal contamination*." Radiat. Prot. Dosim. 79(1-4) 215-218 (1998).

Julião 2003 — Julião, L.M.Q.C., Sousa, W.O., Santos, M.S. and Fernandes, P.C.P. "*Determination of ^{238}U, ^{234}U, ^{232}Th, ^{228}Th, ^{228}Ra, ^{226}Ra and ^{210}Pb concentration in excreta samples of inhabitants of high natural background area.*" Radiat. Prot. Dosim. 105(1-4) 379-382 (2003).

Julião 2007 — Julião,L. Melo, D.R., Sousa, W.O., Santos, M.S., Fernandes, P.C. *Uncertainty on faecal analysis on dose assessment*. Radiat. Prot. Dosim., 127(1-4): 421-424(2007).

Kurttio 2002 — Kurttio, P., Auvinen, A., Salonen, L., Saha, H., Pekkanen, J., Mäkeläinen, I., Väisänen, S.B., Penttilä, I.M. and Komulainen, H. "*Renal Effects of Uranium in Drinking Water*." Environ. Health Perspect. 110(4): 337-342 (2002).

La Bone 1994 — La Bone, T. R. *Evaluation of Intakes of Transuranics Influences by Chelation Therapy*. Internal Radiation Dosimetry, (1994).

Lipsztein 2003 — Lipsztein, J.L., Melo, D.R., Sousa, W., Dias da Cunha, K.M., Azeredo, A.M.G., Julião, L. and Santos, M. "*NORM workers: a challenge for internal dosimetry programmes*." Radiat. Prot. Dosim. 105(1-4) 317-320 (2003).

Lopez 2008 — Lopez MA, Etherington G, Castellani CM, Franck D, Hurtgen C, Marsh JW, Nosske D, Breustedt B, Blanchardon E, Andrasi A, Bailey MR, Balashazy I, Battisti P, Bérard P, Birchall A, Broggio D, Challeton-de-Vathaire C, Cruz- Suarez R, Doerfel H, Giussani A, Hodgson A, Koukouliou V, Kramer GH, Le Guen B, Luciani A, Malatova I, Molokanov A, Moraleda M, Muikku M, Oeh U, Puncher M, Rahola T, Stradling N, Vrba T. Internal dosimetry: towards harmonisation and coordination of research. Radiat Prot Dosim. 131(1)28-33(2008).

Malátová 2000 — Malátová I, Foltánová S. *Uncertainty of the Estimation of Am-241 Content of the Human Body*. Radiat. Prot. Dosim. 89(3-4) 295-299 (2000).

Malátová 2011 — Malátová, I., Becková, V., Tomášek, L. and Hulka, J. "*Content of uranium in urine of uranium miners as a tool for estimation of intakes of long-lived alpha radionuclides*." Radiat. Prot. Dosim. 147(4) 593-599 (2011).

Marsh 2002 — Marsh J.W et al. *Validation of IMBA and IMBA Expert*, presented at the European IRPA Congress 2002 "Towards Harmonization of Radiation Protection in Europe" Florence, Italy, 8-11 October 2002.

Marsh 2007 — Marsh, J.W., Blanchardon, E., Castellani, C.M., Desai, A.D., Dorrian, M.D., Hurtgen, C., Koukouliou, V., Lopez, M.A., Luciani, A., Puncher, M., et al. E*valuation of scattering factor values for internal dose assessment following the IDEAS guidelines: preliminary results*. Radiat Prot Dosim. 127(1-4):339- 342 (2007).

Marsh 2008 — Marsh, J. W. et al. *Internal dose assessments: uncertainty studies and update of IDEAS guidelines and databases within CONRAD Project*. Radiat. Prot. Dosim. 131(1)28-33 (2008).

Miller 2001 — Miller, G., Inkret, W. C., Little, T. T., Martz, H. F., and Schillaci, M. E. *Bayesian Prior Probability Distributions for Internal Dosimetry*. Radiat. Prot. Dosim., 94(4) 347-352(2001).

Miller 2002 — Miller, G., Martz, H. F., Little, T. and Guilmette, R (2002). *Using exact Poisson likelihood functions in Bayesian interpretation of counting measurements*. Health Phys. 83(4), 512-518, 2002.

Miller 2003 — Miller et al. *The application of Bayesian techniques in the interpretation of bioassay data*. Radiat. Prot. Dosim 105(1-4)333-338 (2003).

Miller 2007 — Miller, G. (2007). *Statistical modelling of Poisson/log-normal data*. Radiation Protection Dosimetry *Advanced Access published January 12, 2007*.

MIRD 2009 — W.E Bolch et al. *MIRD Pamphlet 21 a Generalized Schema for Radiopharmaceutical Dosimetry – Standardization of Nomenclature*. J. Nucl.Med. vol.50, pp.477-484, 2009.

Moss et al, 1969 — Moss, W.D., Campbell, E.E., Schulte H.F., et al. (1969) A study of the variations found in plutonium urinary data. Health Phys. 17, 571–578.

Naumann 1998 — Naumann, M., Hänisch, K. and Hartmann, M. "*Levels of natural radionuclides in human excreta in the Berlin area*." Radiat. Prot. Dosim. 79(1-4) 197-200 (1998).

NCRP 2006 — *Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for Their Assessment, Dosimetry and Treatment*. NCRP REPORT No. 156, National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda (MD) 2006.

NCRP 2010 — *Uncertainties in Internal Radiation Dose Assessment*. NCRP REPORT No. 164, National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda (MD) 2010.

Nosske 2008 — D. Nosske et al. *CONRAD task 5.2 Research studies on biokinetic model – 3.2.1 CONRAD Task 5.2.1 – Development, Implementation and quality assurance of Biokinetic Models*. Final report February 2008 , CIEMAT , Madrid, (E).

OECD 1989 — OECD, Nuclear Energy Agency Plutonium Fuel, an Assessment, 1989.

Oeh 2007 — Oeh, U., Li, W.B., Höllriegl, V., Giussani, A., Schramel, P., Roth, P. and Paretzke, H.G. "*Daily uranium excretion in German peacekeeping personnel serving on the Balkans compared to ICRP model prediction*." Radiat. Prot. Dosim. 127(1-4) 329-332 (2007).

Okabayashi 1982 — Okabayashi, H. "*A study on the excretion of Pb-210 and Po-210*." J. Radiat. Res. 23(2): 242-252 (1982).

Okabayashi 1975 — Okabayashi, H., Suzuki-Yasumoto, M., Hongo, S. and Watanabe, S. "*On the Evaluation of Po-210 Bioassay for Uranium Mine Workers in Japan for the Personal Exposure Index to Radon Daughters*." J. Radiat. Res. 16(2) 142-151 (1975).

PNNL 2009 — Pacific Northwest National Laboratory (PNNL). *Methods and Models of the Hanford Internal Dosimetry Program*, PNNL-MA-860. Report PNNL-15614, Rev. 1 , Richland, Washington.

Potter 2002 — C. Potter. *Intake retention fractions developed from models used in the determination of dose coefficients developed for the ICRP Publication 68 - Particulate Inhalation.* Health Physics, 83 (5) 594-789 (2002).

Puncher 2007 — Puncher M, Birchall, A and Marsh JW. *The autocorrelation coefficient as a tool for assessing goodness of fit between bioassay predictions and measurement data*. Radiat. Prot. Dosim. 127(1-4): 370-373(2007).

Radford 1964 — Radford, E.P.J. and Hunt, V.R. "*Polonium-210: A Volatile Radioelement in Cigarettes*." Science 143(3603): 247-249 (1964).

Riddell et al, 1994 — Riddell, A.E., Britcher, A.R. Pluto – *A software package using the maximum likelihood method to fit plutonium in urine data to an excretion function*. Radiat. Prot. Dosim. 53 (1-4) 199–201(1994).

Roth 2005 — Roth, P., Höllriegl, V., Li, W.B., Oeh, U. and Schramel, P. "*Validating an important aspect of the new ICRP biokinetic model of thorium.*" Health Phys. 88(3): 223-228 (2005).

Santos 1994 — Santos, P.L., Gouvea, R.C. and Dutra, I.R. "*Concentrations of 210Pb and 210Po in hair and urine of workers, of the uranium mine at Pocos de Caldas (Brazil)*." Sci. Total Environ. 148: 61-65 (1994).

Schäfer 2004 — Schäfer, I., Seitz, G. and Hartmann, M. "*Excretion rates of 226Ra in urine and faeces of members of general population and workers at selected NORMworking*

places in Germany." 11th International Congress of IRPA., Madrid, Spain.- 23 - 28 May 2004.

Schäfer 2006 — Schäfer, I., Seitz, G. and Hartmann, M. "*Investigations of excretion rates of the radionuclides 230Th, 226Ra, 210Pb and 210Po of persons of the general population and of workers in selected regions in Germany*." European IRPA Congress on Radiation Protection: from knowledge to action., Paris, France.- 15-19 May 2006.

Skrable et al, 1994 — Skrable, K., Chabot, G., French, C.M. (1994). *Estimation of intakes from repetitive bioassay measurements, in Internal Radiation Dosimetry*. (RAABE, O.G., Ed.). Medical Physics Publishing, Madison, WI, USA.

Spencer 1973 — Spencer, H., Kramer, L. and Samachson, J. "*Intake and Excretion Patterns of Naturally Occurring Radium-226 in Humans*." Radiat. Res. 56(2): 354-369 (1973).

Spencer 1977 — Spencer, H., Holtzman, R.B., Kramer, L. and Ilcewicz, F.H. "*Metabolic balances of ^{210}Pb and ^{210}Po at natural levels*." Radiat. Res. 69(1): 166-184 (1977).

Spencer 1990 — Spencer, H., Osis, D., Fisenne, I.M., Perry, P.M. and Harley, N.H. "*Measured intake and excretion patterns of naturally occuring ^{234}U, ^{238}U, and calcium in humans*." Radiat. Res. 124: 90-95 (1990).

Spencer 2007 — Spencer, D., Bull, R.K. and Cormack, L. "*Distribution of uranium in Dounreay workers due to uptake from the environment*." Radiat. Prot. Dosim. 127(1-4) 415-417 (2007).

Taddei 2001 — Taddei, M.H.T., Silva, N.C., Fernandes, E.A.N. and Cipriani, M. "*Determination of alpha-emitting isotopes of uranium and thorium in vegetables and excreta*." J. Radioanal. Nucl. Chem. 248(2): 483-486 (2001).

Taylor 1964 — Taylor, M.P., Hibbert, P. and Lambert, B.E. "*Determination of polonium-210 in urine by track counting*." Int. J. Appl. Radiat. Isot. 15(11): 665-669 (1964).

Taylor, D. M. (2003) — Taylor, D. M.. *A biokinetic model for predicting the retention of 3H in the human body after intakes of tritiated water*. Radiat. Prot. Dosim. 105(1- 4)225-228 (2003).

Thomas 2001 — Thomas, P.A., Fisenne, I., Chorney, D., Baweja, A.S. and Tracy, B.L. "*Human absorption and retention of polonium-210 from caribou meat*." Radiat. Prot. Dosim. 97(3) 241-250 (2001).

Toohey 2011 — R.E. Toohey et al. *Dose Coefficients for intakes of Radionuclides via Contaminated Wounds*. Health Phys. 100(5): 508-514 (2011).

UNEP 2002 — *Depleted Uranium in Kosovo - A Post-Conflict Assessment*. ISBN No: 92-807- 2146-1 – UNEP.

Vrba 2010 — Vrba T.. *Uncertainty of in vivo assessment of actinides activity in human skeleton*. Third Europen IRPA congress, Helsinki 14-18. June 2010. (available at http://www.irpa2010europe.com/proceedings.htm) pp. 836-841

Weise 1993 — K. Weise and W. Woger. *A Bayesian theory of measurement uncertainty*. Meas. Sci.Technol. 4, 1-11 (1993).

Weise 2006 — K. Weise et al.. *Bayesian decision threshold, detection limit and confidence limits in ionizing-radiation measurement*. Radiat. Prot. Dosim. 121(1) 52- 63(2006).

Wrenn 1992 — Wrenn, M.E., Ruth, H., Burleigh, D.P. and Singh, N.P. "*Background levels of uranium in human urine*." J. Radioanal. Nucl. Chem. Articles 156(2): 407-412 (1992).

Abreviaturas y símbolos

AMAD	Mediana de los Diámetros Aerodinámicos en Actividad
A_U	Área bajo los datos de concentración de actividad, ecuación (12.4)
b	Constante numérica igual a 86400 s/d, ecuación (12.2)
C_i	Concentración de actividad de agua tritiada en una muestra **i** de orina
CIS	Estado coloidal e intermedio
CONRAD	Red Coordinada de Trabajo para la dosimetría de la radiación: Proyecto financiado por la Comisión Europea dentro del Programa del 6º Acuerdo Marco para la investigación y entrenamiento en energía nuclear, (Ene-2005 – May 2008).
Cm	Factor de normalización en la ecuación (4.2)
D	Dosis efectiva comprometida evaluada en la Tabla 6.1
D_T	Promedio de dosis absorbida en un órgano o tejido T
DTPA	Ácido dietileno triamina pentaacético
E(50)	Dosis efectiva comprometida
E	Dosis efectiva
ELP	Ejercicios para los participantes
f_1	Fracción absorbida en sangre según el modelo gastrointestinal de ICRP-30
f_A	Fracción del material entrante en el tracto alimenticio que es absorbida en ausencia del decaimiento radiactivo o entrada endógena al tracto.
$F_{1\text{-}3}$	Excreción acumulada en heces en los 3 primeros días tras la incorporación
$F_{INGHeces}$	Fracción de la actividad ingerida en la excreción acumulada fecal (apartado 10.3)
$F_{INHHeces}$	Fracción de la actividad inhalada en la excreción acumulada fecal (apartado 10.3)
F_{INH}	Fracción inhalada de una incorporación mixta de inhalación e ingestión (apartado 10.3)
F_P	Fracción de la actividad inhalada que se deposita en los pulmones (apartado 10.3)
GLs	Guías
H_T^H	Dosis equivalente en un órgano o tejido T del hombre de referencia
H_T^M	Dosis equivalente en un órgano o tejido T de la mujer de referencia
H_{resto}^H	Dosis equivalente para el resto de los tejidos del hombre de referencia
H_{resto}^M	Dosis equivalente para el resto de los tejidos de la mujer de referencia
HATM	Modelo del tracto alimenticio humano
HRTM	Modelo del tracto respiratorio humano
HTO	Agua tritiada
I	Incorporación
ICRP	Comisión Internacional de Protección Radiológica

ICP-MS	Espectroscopia de masas por plasma acoplado inductivamente
IDEAS	Guías generales para la estimación de la dosis efectiva comprometida a partir de datos de vigilancias de la incorporación (Giía IDEAS)
IMIE	Software para la vigilancia individual de la exposición interna
IMBA™	Módulos integrados de software para la evaluación de medidas de bio-análisis
ISO	Organización internacional de estandarización
I	Número de parámetros variables para un modelo lineal
k	Número de incorporaciones múltiples en el apartado 14.2.4
LD	Límite de detección
$L_i(I)$	Función de probabilidad de observar un valor de medida M_i dada una incorporación real ***I***
LN	Nódulos linfáticos
M	Magnitud medida (p.e. actividad de todo el cuerpo o de la excreción urinaria diaria)
M_c	Magnitud crítica de vigilancia
m(t)	Función de retención o excreción en el momento ***t*** por unidad de incorporación
m(T/2)	Función de retención o excreción en el punto medio del intervalo T de vigilancia por unidad de incorporación
mSv	MiliSievert
NCRP	Consejo Nacional sobre Protección Radiológica y Medidas
n	Número de medidas disponibles, ecuaciones (6.1), (12.3)
n_{bio}	Número de datos de bio-análisis en la ecuación (14.18)
N	Valor neto de la actividad
N_B	Número de cuentas medidas del fondo en la ecuación (4.2)
N_G	Número de cuentas medidas en la ecuación (4.2)
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica con sede en Viena (Austria) International
OIR	Incorporación ocupacional de radionucleidos
P_3	Actividad en pulmones el día 3 después de la incorporación
P	Contribución en la medida M de todas las incorporaciones previas analizadas
PABS	Partículas, agregados y estado ligado
R	Coeficiente de correlación
R_B	Tasa de cuentas del fondo en la ecuación (4.2)
R_i	Residuo ***i*** normalizado en las ecuaciones (6.1), (14.13)
$SEE^H(T \rightarrow S)$	Energía efectiva específica para el hombre de referencia (S = región fuente, T = blanco)
SF	Factor de dispersión
SF_A	Componente del factor de dispersión debido a la estadística de contaje
SF_B	Componente del factor de dispersión debido a todas las demás incertidumbres
$SF_{o,i}$	Factor de dispersión relacionado con la medida ***i*** de orina

$SF_{h,j}$	Factor de dispersión relacionado con la medida ***j*** de heces
T	Periodo de vigilancia
T_B	Tiempo de contaje del fondo en la ecuación (4.2)
T_S	Tiempo de contaje de la muestra en la ecuación (4.2)
TIMS	Espectrometría de masas por ionización térmica
TPA	Partículas atrapadas y agregados
Tr-KPA	Análisis por fosforescencia cinética
UD	Umbral de decisión
$U_S(50)$	Número de transformaciones nucleares en 50 años en la región S
WG7	Grupo de trabajo 7 de dosimetría interna dentro de EURADOS
w_T	Factor de ponderación del tejido
x_{50}	Mediana de todos los valores medidos en un momento ***t*** después de la incorporación
χ_o^2	Valor observado del chi-cuadrado
χ_h^2	Valor observado del chi-cuadrado calculado del conjunto de datos de heces
χ_o^2	Valor observado del chi-cuadrado calculado del conjunto de datos de orina
$\widetilde{\chi}_o^2$	Valor observado del chi-cuadrado reducido
ρ	Prueba estadística de autocorrelación
ρ_h	Valor calculado de autocorrelación para el conjunto de datos de heces
ρ_o	Valor calculado de autocorrelación para el conjunto de datos de orina
σ_A	Incertidumbre de tipo A


SEPR
SOCIEDAD ESPAÑOLA DE
PROTECCIÓN RADIOLÓGICA


S.A.R.