

29-05 Cálculo de la retención y de la excreción en personas expuestas profesionalmente a múltiples incorporaciones crónicas. Aplicación a aerosoles de UO₂.

Autores: J. Guillermo Sánchez León;

ENUSA Industrias Avanzadas S.A. Fca Juzbado; Ctra Salamanca-Ledesma, km 16; 37115 SALAMANCA

Teléfono: 923 329753

E-mail: gsl@enusa.es

Resumen – La retención y/o excreción urinaria o fecal para trabajadores expuestos a la incorporación de isótopos radiactivos suele calcularse usando códigos de cálculo que resuelven los modelos biocinéticos de la ICRP para el isótopo o isótopos incorporados que habitualmente consideran dos situaciones: incorporaciones puntuales y/o constantes (crónicas) y un solo tipo de metabolización. En muchas situaciones pueden ocurrir incorporaciones constantes durante un cierto periodo y otros en los que el trabajador deja de estar expuesto (por ejemplo: vacaciones o bajas). Este mismo trabajador puede seguir siendo sometido a bioensayos, incluso en periodos en los que no está expuesto. Se ha desarrollado un método, que se programado utilizando el lenguaje Mathematica, que calcula la retención y/o excreción en situaciones como las descritas. En combinación con BIOKMOD se ha aplicado para estudiar el efecto de las variaciones diarias y estacionales (descansos de fin de semana, vacacionales, etc.) tienen en la retención y excreción en personas profesionalmente expuestas a aerosoles de UO₂.

1. INTRODUCCIÓN.

Los trabajadores expuestos profesionalmente a la incorporación de isótopos radiactivos frecuentemente están sometidos a controles dosimétricos mediante la realización de bioensayos. Estos bioensayos suelen consistir en medida de la retención del isótopo (o isótopos) en los pulmones o en todo el cuerpo, y/o determinación de la eliminación por excreción urinaria y/o fecal del isótopo(s) en muestras recogidas durante 24 h. El fin de los bioensayos es estimar la actividad incorporada por el trabajador durante un tiempo y con este valor calcular la dosis efectiva en el mismo periodo. Para estimar las incorporaciones suelen utilizarse programas de cálculo que disponen los modelos metabólicos de la ICRP apropiados para los isótopos que se evalúan. Para poder realizar estimar la incorporación es necesario hacer algunas asunciones sobre la forma en la que se ha realizado la incorporación, normalmente se consideran dos situaciones: exposición puntual (caso de exposiciones accidentales) o exposición crónica (continua durante un largo periodo). Aquí nos estudiaremos el caso de incorporaciones constantes durante ciertos periodos y otros en los que el trabajador deja de estar expuesto (por ejemplo: vacaciones o bajas, personal de contratas). Además el trabajador puede cambiar de área de trabajo y como consecuencia la incorporación medida diaria de un área a otra puede variar sustancialmente. Con el fin de estimar las incorporaciones en estas situaciones hemos desarrollado un método de cálculo. Para ello hemos utilizado BIOKMOD (Sanchez 2007), que incluye los modelos biocinéticos de la ICRP, conjuntamente con técnicas de regresión no lineal programadas utilizando el Wolfram Language (Mathematica). Lo hemos aplicado al caso de trabajadores expuestos profesionalmente a aerosoles de UO₂ a los que se les toma periódicamente muestras urinarias de 24 h y a las que se determina la actividad isotópica de U.

2. EL MODELO.

Consideremos que un trabajador empieza a estar expuesto a un determinado tipo de isótopo, en $t = 0$. Cada día incorporara una cantidad b_j . Suponemos que durante este tiempo la forma química y tamaño medio de los aerosoles incorporados es constante. Sea $r(t)$ la función de retención/excreción (referida a un tipo de retención o excreción concreta, por ejemplo: pulmonar o excreción urinaria-24 h) para una función impulso-respuesta (es decir: exposición única $b=1$) para ese tipo de aerosoles, entonces trascurrido un tiempo t la cantidad retenida (o excretada), $R(t)$, el será:

$$R(t) = b_1 r(t) + b_2 r(t-1) + \dots + b_n r(1) = \sum_{j=1}^t b_j r(t-j+1) \quad (1)$$

(nota: supondremos que t solo toma valores enteros)

Asumimos que la cantidad incorporada diariamente es $b = 1$ Bq y está expuesto hasta $t = T$ donde cesa. Entonces la retención (o excreción) $rc(t, T)$ podemos calcularla utilizando la siguiente ecuación.

$$rc(t, T) = \left\{ \int_0^t r(t) dt \text{ for } 0 < t \leq T \text{ & } \int_{t-T}^t r(t) dt \text{ for } t > T \right\} \quad (2)$$

La ecuación anterior podemos utilizarla para calcular la retención en el caso de que el trabajador esté expuesto a múltiples incorporaciones constantes.

Consideremos que durante un intervalo T_i , que va de t_i a $t_i + T_i$, el trabajador incorpora una cantidad total B_i con una incorporación media diaria $b_i = B_i/T_i$. Entonces, trascurrido un tiempo t correspondiente a n intervalos la retención o excreción estará dada por la función:

$$RMultiple(t) = \frac{B_0}{T_0} rc(t-t_0, T_0) + \frac{B_1}{T_1} rc(t-t_1, T_1) + \dots + \frac{B_n}{T_n} rc(t-t_n, T_n) = \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{T_i} rc(t-t_i, T_i) \quad (3)$$

A lo largo de ese tiempo el trabajador es sometidos a un tipo de bioensayos (por ej.: medida de la excreción urinaria). Se trata de estimar los B_i utilizando los resultados de los bioensayos.

Un caso simple es estimar B_0 supuesto que se ha realizado un bioensayo en T_0 , con $t_0=0$, que ha dado como resultado m_0 . Si la incertidumbre de esta medida es despreciable comparada con m_0 , entonces para estimar B_0 basta con despejarlo en:

$$m_0 = B_0/T_0 rc(T_0) \rightarrow B_0 = m_0 T_0 / rc(T_0),$$

Obviamente si lo que queremos es la incorporación media diaria en el intervalo está será:

$$b_0 = m_0 T_0 / rc(T_0),$$

En la práctica m_i tiene una incertidumbre asociada u_i que debe tenerse en cuenta. Cuando disponemos de los resultados m_i , con incertidumbre u_i , entonces podemos estimar los B_i por mínimos cuadrados minimizando aplicando la expresión siguiente:

$$\{B_1, B_2, \dots, B_i\}: \text{Min}[\sum((y_i - m_i)/u_i)^2] \text{ con } y_i = \text{RMultiple}(t_i) \quad (4)$$

En la práctica lo normal es realizar las medidas al inicio y al final de cada periodo de exposición T_i , sin embargo esto no es un requisito para aplicar (4). La expresión anterior tiene un carácter bastante general, puede aplicarse cuando existir periodos en los que la muestra se tome en un periodo donde no haya incorporación y esta puede tomarse en cualquier momento, no tiene por que coincidir con el comiendo o fin de un periodo de exposición.

3. APLICACIÓN A LA INCORPORACION DE AEROSOLES DE UO₂.

Una aplicación típica del método anterior es la exposición de trabajadores expuestos a aerosoles de UO₂, como ocurre en el personal que trabaja habitualmente en la zona cerámica de la Fábrica de Combustible Nuclear de Juzbado que ENUSA tiene en Juzbado. Durante años el tipo de bioensayo que se realizaba era medidas de la retención pulmonar (CRC) que se cumplimentaba con medidas de U total en orina. El problema que presenta el CRC es que la actividad mínima detectable es del orden de 5 Bq ²³⁵U en los pulmones (aprox. a 90 BqU enrq. 4%) y que para que un trabajador retenga esta cantidad tiene que estar expuesto a un tiempo muy largo a una incorporación crónica superior a la que habitualmente se da la zona cerámica de Juzbado. Por eso, las medidas en el CRC han sido sustituidas por medidas por espectrometría alfa de U de la muestras de excreción urinaria de 24 h. Esta técnica presenta un límite inferior de detección muy bajo, de hecho no es infrecuente detectar uranio en orina en personas no expuestas profesionalmente a incorporaciones de uranio.

Veamos cómo estimar la incorporación de U a partir de estas muestras utizando el método descrito en el apartado anterior. Para ello utilizaremos la función de excreción urinaria $r_{excu}(t)$, obtenida con Biokmod, correspondiente a una incorporación puntual de 1 BqU de aerosoles tipo S y AMAD 5 mm que es la siguiente:

$$r_{excu}(t) = +2.70 \cdot 10^{-6} \text{ Exp}(-0.344 t) + 3.47 \cdot 10^{-6} \text{ EXP}(-0.139 t) + 6.40 \cdot 10^{-7} \text{ EXP}(-0.0990 t) + 0.0000163 \text{ EXP}(-0.0973 t) + 3.17 \cdot 10^{-6} \text{ EXP}(-0.0301 t) + 2.11 \cdot 10^{-6} \text{ EXP}(-0.0201 t) + 1.04 \cdot 10^{-6} \text{ EXP}(-0.0126 t) + 3.06 \cdot 10^{-6} \text{ EXP}(-0.0011 t) + 4.32 \cdot 10^{-7} \text{ EXP}(-0.00020 t) + 1.17 \cdot 10^{-7} \text{ EXP}(-0.00010 t); \quad (5).$$

BIOKMOD da una expresión que incluye más términos cuya efecto es insignificante cuando se analiza la evolución para $t > 2$. La presencia de estos términos originan una fuerte variabilidad en la estimación de la eliminación en los momentos inmediatamente posteriores (días 1 y 2) a la incorporación, y frecuentemente no se conoce el momento exacto en el que se produjo la incorporación, ni puede controlarse la excreción, además la eliminación inicial puede verse muy afectada por circunstancias individuales. Por ello, desde un punto de vista práctico, puede ser conveniente esperar dos días sin incorporación antes de tomar la muestra.

En la figura 1 se ha simulado la excreción urinaria de un trabajador que ha estado expuesto un largo tiempo a una incorporación crónica, aproximadamente constante, tras ese periodo cesa la incorporación (jubilación, baja temporal, cambio de trabajo, o cualquier otra circunstancia). El cálculo se ha realizado de dos formas: i) Utilizando la ec.(1) y (5) teniendo en cuenta que en los descansos periódicos (fines de semana y vacaciones) no hay incorporación, ii) Aplicando la ec.(2) y (5), suponiendo que la incorporación media diaria es constante durante todos los días naturales. El

resultado obtenido aplicando ambos criterios se muestra en la fig. 1. Obsérvese que la retención media es muy próxima si las muestras se toman a la mitad entre dos periodos vacacionales, por ejemplo: si las vacaciones son en agosto, febrero es un buen mes para tomar las muestras, además es conveniente tomarlas tras dos días de descanso (por ejemplo: si el trabajador finaliza su turno a las 14 h del viernes y empieza al segundo turno del lunes, el mejor momento para tomar la muestra es desde las 14 h del domingo hasta las 14 h del lunes).

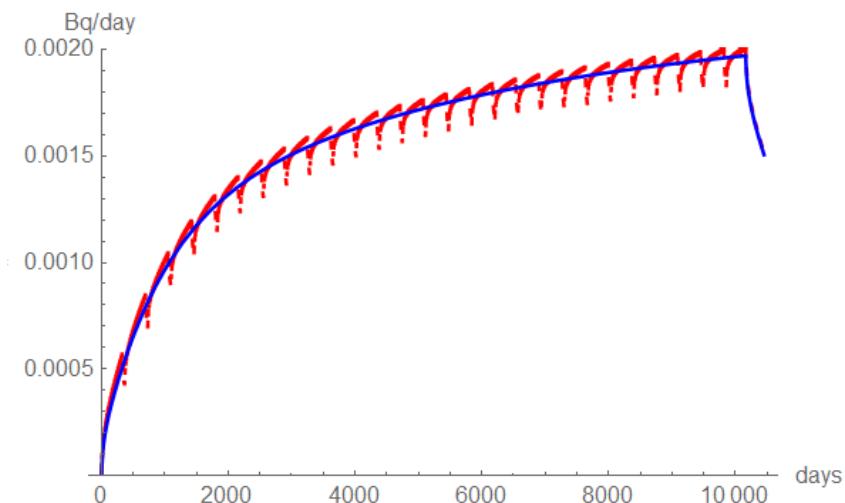


Figura 1. Excreción urinaria teórica (trabajador expuesto a una exposición crónica de aeroles de UO₂, AMAD 5) que cesa. La curva a trazos tiene en cuenta descansos, la continua utiliza el valor medio de la incorporación)

Consideremos un caso algo más complicado. Supongamos que un trabajador está expuesto un largo periodo (usualmente varios años), deja de estar expuesto por un tiempo (meses) para volver a incorporarse al mismo puesto de trabajo. El proceso puede repetirse periódicamente (estas circunstancias se dan en casos como el de trabajadores de contratas, jubilación parcial, bajas temporales, etc.). Este trabajador puede tomarse muestras periódicas de excreción urinaria. Para estimar las incorporaciones en estos casos podemos utilizar la ec. (4) que la hemos programado en Mathematica.

Para poder realizar la estimación es necesario definir en la ec. (4) los períodos en los que se considera que la incorporación puede considerarse aproximadamente constante. Como la normativa normalmente requiere estimar las dosis anualmente un criterio es considerar el año como periodo de exposición constante. Otro criterio es tomar como periodo de exposición constante el que va entre dos bioensayos, pero esto tiene el problema de que en ese periodo puede que el trabajador no haya estado expuesto todos los días laborables (vacaciones, bajas cortas). Obviamente pueden tomarse muchas muestras pero esto no es práctico, además de costoso. En el caso de los trabajadores de la fábrica de Juzbado se disponen de tomamuestras de área que registran la concentración por turno y se tiene un registro del tiempo que el trabajador ha pasado en ese área (de hecho hasta hace poco era la información con la que se realizaba la asignación de la dosis interna). Esta información permite evaluar los períodos en los que la incorporación del trabajador puede considerarse constante. Hemos visto (Fig. 1) que aunque este oscile mucho de un día a otro lo importante es que la concentración media en períodos largos varía poco. Por ejemplo: se en dos años consecutivos en una misma área la concentración media anual varía poco podemos considerar que esos dos años las condiciones de

exposición han sido aproximadamente constantes, es decir supones que la incorporación diaria, en los días que ha trabajado, ha sido la misma. En la fig. 2 mostramos un caso en el que hemos aplicado este criterio. Corresponde a un trabajador que ha estado expuesto varios años a una incorporación de aerosoles de UO₂, tras lo cual ceso la incorporación para volver a estar expuesto con posterioridad durante varios períodos cortos. A este trabajador se le han tomado 4 muestras de orina de 24 h en distintos momentos. La curva ajustada con los datos de la incorporación estimada conjuntamente con los resultados de las muestras se representa en la fig. 2. En la fig. 3 hemos supuesto dos intervalos (hasta el día 10070 y después de este día) en los que la incorporación diaria, los días de exposición, fue idéntica dentro de cada intervalo.

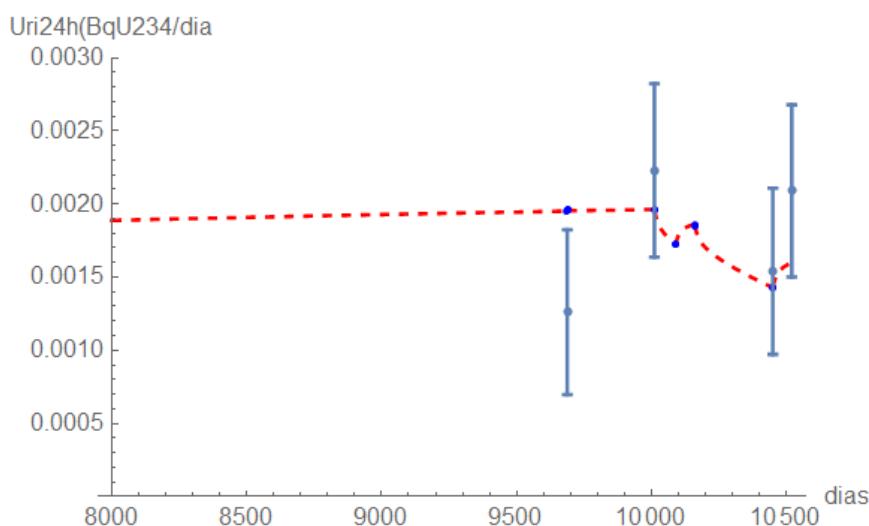


Figura 2.- Excreción urinaria estimada asumiendo una incorporación diaria idéntica en los períodos en los que el trabajador ha estado expuesto.

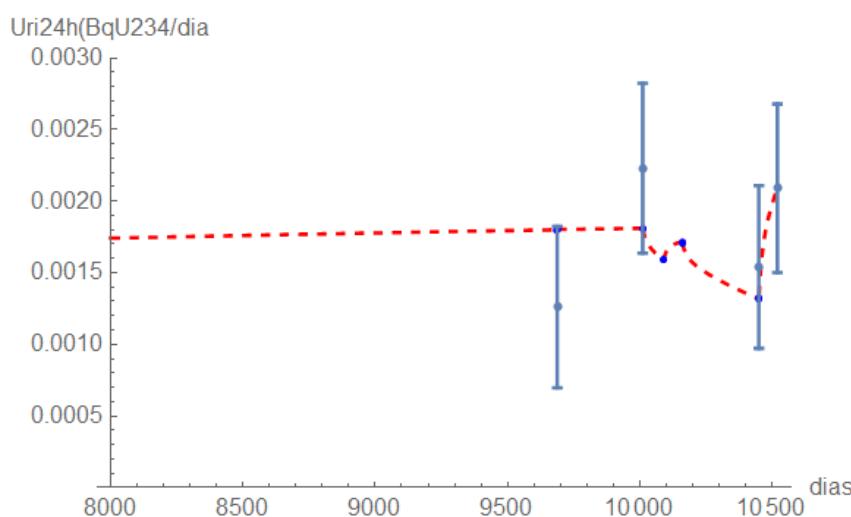


Figura 3.- Excreción urinaria considerando dos intervalos (hasta el día 10070 y después de este día) en los que la incorporación diaria, los días de exposición, fue idéntica dentro de cada intervalo.

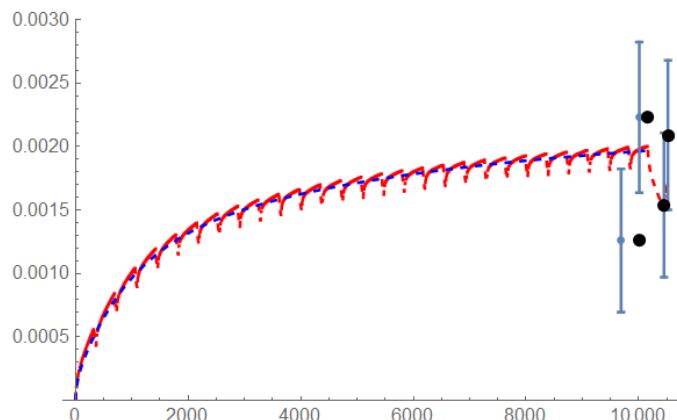


Figura 4.- Excreción urinaria, para caso representado en la Fig. 3, considerando que fines de semana y vacaciones no hay incorporación.

En la fig. 4 mostramos el mismo caso que el correspondiente a la Fig. 3, pero hemos tenido en cuenta que fines de semana y vacaciones no hay incorporación.

4. CONCLUSIONES.

Hemos descrito una metodología aplicar los resultados de bioensayos para evaluar incorporaciones crónicas a intervalos. Lo hemos aplicado para analizar el caso de los trabajadores de la fábrica Juzbado (de ENUSA) sometido a programas de vigilancia de excreción urinaria que durante largos periodos están expuestos a aerosoles de UO₂, produciéndose períodos relativamente largos sin exposición (bajas, personal en jubilación parcial, contratas). Asimismo se ha estudiado el efecto de los descansos semanales y vacacionales. Una conclusión importante es que los casos estudiados en un periodo largo la incorporación total, y por tanto la dosis, es aproximadamente idéntica. Hemos visto que para una mejor valoración en la estimación de la dosis además de los resultados de los bioensayos deben tenerse en cuenta la información que proporcionan los tomamuestras. Otro factor a tener en cuenta es la presencia de uranio en la orina no debido a la exposición profesional, que es significativo dado que las incorporaciones de los trabajadores de la fábrica de Juzbado son bajas.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco la colaboración de ENUSA Industrias Avanzadas S.A. y la del CIEMAT, que realiza los análisis de las muestras y la evaluación dosimétrica oficial. Investigación apoyada parcialmente por MINECO (Proyecto MTM 2013-47879-C2-2-PY JCYL (Proyecto SA130U14).

REFERENCIAS.

- ICRP, 2015. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. ICRP 44(2)
- Lopez-Fidalgo J; Sánchez G; Statistical Criteria to Establish Bioassay Programs. Health Physics. 89 (4). 2005. ISSN/ISBN: 0017-9078
- Sánchez G; "Fitting bioassay data and performing uncertainty analysis with BIOKMOD" Health Physics. 92(1): 64-72. 2007. ISSN/ISBN: 0017-9078