

CRITERIOS ESTADÍSTICOS APLICABLES A LOS CONTROLES AMBIENTALES Y A LA REALIZACIÓN DE BIOENSAYOS EN TRABAJADORES EXPUESTOS A LA INHALACIÓN DE AEROSOL RADIATIVOS

José Guillermo Sánchez. ENUSA. y Universidad de Salamanca

Ramón Ardanuy. Dpto. Estadística de la Universidad de Salamanca

RESUMEN. *La normativa sobre Protección Radiológica deja un amplio margen a su interpretación. El establecimiento de criterios estadísticos contribuiría a una interpretación más homogénea y objetiva. Con tal fin hemos desarrollado un método, basado en técnicas de simulación, para estimar el riesgo radiológico de personas expuestas a la inhalación de aerosoles de uranio en áreas dotadas de tomamuestras fijos que se miden periódicamente. En el estudio se han utilizado datos experimentales que nos han llevado a emplear distribuciones normales y lognormales censuradas para tener en cuenta la presencia de valores por debajo del límite de detección. De los resultados pueden derivarse criterios aplicables al control radiológico de personas expuestas a la inhalación de aerosoles y al establecimiento de programas de bioensayos.*

SUMMARY. *The Health Physics regulations should be more precise. Statistical criteria should be used by licensees to determine when monitoring or bioassay is required. Simulation techniques are applied to estimate the intake and the lung retention, and uncertainties, in workers exposed to uranium airborne in areas where the activity are periodically monitored with air samplers. Experimental data are used. An improved method for normal and lognormal censored distribution is utilized to take into account lower level detection values. All these methods can be useful for the design and the conduct of the air control and for the bioassay monitoring.*

INTRODUCCIÓN

La normativa sobre Protección Radiológica establece los tipos de controles que deben aplicarse sobre el personal profesionalmente expuesto, según el riesgo radiológico previsible para el grupo al que se aplique, pero es poco precisa en indicar cómo se calculan estos riesgos. Por ejemplo: El Reglamento de Protección Sanitaria contra las Radiaciones Ionizantes (RPSCRI) dice que debe considerarse trabajador de categoría B aquél que por las condiciones en las que realiza su trabajo es muy improbable que reciba dosis superiores a 3/10 de los límites

anuales de dosis. La cuestión es cómo determinar que es "muy improbable" superar un límite determinado. El NUREG 1400 punto 3.5 dice al respecto: "La predicción debería estar basada en la experiencia previa de las medidas de las concentraciones ambientales y de los incorporaciones".

No pretendemos dar una respuesta general a la cuestión anterior. Nos centraremos en la evaluación del riesgo radiológico de los trabajadores expuestos a la inhalación de aerosoles radiactivos de uranio y, en función de éste, determinar que tipo de controles radiológicos deben aplicarse (Por ej.: Método de asignación de dosis, necesidad o no de realizar bioensayos,

periodicidad, frecuencia de muestreo, etc.). Nos basaremos en la experiencia operacional de la fábrica de elementos combustibles para reactores nucleares de Juzbado (ENUSA). Ésta tiene una zona, denominada Zona Cerámica, donde se manipula óxidos de uranio ligeramente enriquecido en forma no encapsulada. La instalación está diseñada para minimizar la exposición de los trabajadores a la inhalación de aerosoles de uranio pero el riesgo no es nulo, requiriéndose su control radiológico. Nosotros hemos desarrollado un método [1] que permite evaluar con criterios estadísticos el riesgo de exposición interna de las personas que trabajan en este área. Hemos recurrido a técnicas de simulación [2] para lo que hemos empleado el programa de cálculo *Mathematica* [3]. Aunque nos referimos a una instalación concreta y a aerosoles de UO_2 , la metodología desarrollada podría extenderse a otros tipos instalaciones y compuestos.

ESTIMACIÓN DE LAS INCORPORACIONES UTILIZANDO TOMAMUESTRAS FIJOS

La estimación de las incorporaciones individuales del personal que trabaja en la zona indicada se realiza según un método que se describe a continuación. Un trabajador cualquiera se desplaza a lo largo de la jornada d a distintas posiciones i , en las que permanece un tiempo Δt_{ijd} que es anotado por el trabajador en un estadillo. La actividad inhalada I_{ijd} por un individuo en Δt_{ijd} es: $I_{ijd} = v C_{ijd} \Delta t_{ijd}$, donde v es la tasa estándar de respiración humana. La actividad total inhalada I_d por el trabajador durante la jornada d será:

$$I_d = v \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ijd} \Delta t_{ijd} \quad (1)$$

Los puntos i más habituales en los que permanecen los trabajadores disponen

de tomamuestras fijos que miden las concentraciones ambientales de aerosoles de uranio. Cada tomamuestras i puede considerarse representativo de las condiciones de inhalación del trabajador mientras permanece en sus proximidades. Los tomamuestras están dotados de filtros que se cambian con un periodo T , que suele coincidir con la duración de la jornada laboral d . La actividad retenida en el filtro i al finalizar la jornada d es medida y la designaremos por A_{id} . A partir de A_{id} es inmediato deducir la concentración media C_{id} en el mismo punto i y tiempo $d = T$ y está dada por

$$C_{id} = A_{id} / (r T) \quad (2)$$

donde r es el caudal de aspiración del filtro. Usualmente se toma $r = v = 1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ y así lo consideraremos en adelante.

De (1) y (2) y siendo $W_{id} = \sum_{j=1}^m \Delta t_{ijd}$ el tiempo total de permanencia por jornada d en cada punto i , se obtiene I_d (3). A partir de estos valores son asignada individualmente las dosis internas.

$$I_d \approx v \sum_{i=1}^n A_{id} W_{id} \quad (3)$$

(Obsérvese que en la expresión anterior se asume que la concentración media C_{ijd} en el tomamuestras i en el Δt_{ijd} es igual C_{id} que es la concentración media correspondiente a toda la jornada d . De ahí que se utilice una aproximación en vez de una igualdad).

SIMULACIÓN DE LAS INCORPORACIONES DIARIAS: APLICACIÓN A LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO RADIOLOGICO

En este apartado vamos a estimar la probabilidad de que un trabajador supere un límite de incorporación determinado. Para ellos dividiremos al conjunto de los trabajadores expuesto

a la incorporación de aerosoles en grupos $\{G_1, \dots, G_i, \dots, G_p\}$ según realicen actividades similares. Consideremos un grupo cualquiera G_i . Los trabajadores de este grupo se desplazan por n puntos de muestreo (fig. 1). Elegiremos exclusivamente los puntos donde permanecen la mayor del tiempo despreciando aquellos que visitan esporádicamente (Por ejemplo, en los casos estudiados, cada grupo permanece la mayor parte de su tiempo en 4 o 5 puntos frente a los casi doscientos puntos de muestreo que dispone el conjunto de la zona cerámica). Se trata de construir un modelo estadístico que permita simular las incorporaciones I_d :

- Buscaremos una función de probabilidad $f_i(a)$ por punto de muestreo i a la que pueda aproximarse los valores experimentales $\{A_{i1}, \dots, A_{id}\}$. Las funciones $f_i(a)$ aplicables a los distintos puntos i son del mismo tipo, aunque con diferentes parámetros.
- Igualmente se buscará una función de probabilidad $g_i(w)$ representativa de la variación del tiempo W_{id} de permanencia en cada punto i . Igual que ocurre con $f_i(a)$ las funciones $g_i(w)$ correspondiente a los distintos puntos i son del mismo tipo.

La cantidad incorporada, $I_k^{(d)}$, una jornada d cualquiera por un individuo k puede simularse por (4) que se obtiene sustituyendo en (3) A_{id} por $f_i^{(d)}[a]$ y W_{id} por $g_i^{(d)}[w]$ donde $f_i^{(d)}[a]$ y $g_i^{(d)}[w]$ representan números pseudoaleatorios generados utilizando como funciones de densidad $f_i(a)$ y $g_i(w)$.

$$I_k^{(d)} = v \sum_{i=1}^n f_i^{(d)}[a] g_i^{(d)}[w] \quad (4)$$

Aplicando este método simulamos las incorporaciones diarias $\{I_1^{(1)}, I_1^{(2)}, \dots, I_1^{(h)}\}$ a lo largo del periodo $[0, D]$. La incorporación total durante el mismo periodo será $I_k^D = \sum_{d=1}^D I_k^{(d)}$. De la

misma forma simulamos las incorporaciones diarias de m individuos.

$$\begin{aligned} \text{Para } k = 1 & \quad \{I_1^{(1)}, I_1^{(2)}, \dots, I_1^{(h)}\} \\ \text{Para } k = 2 & \quad \{I_2^{(1)}, I_2^{(2)}, \dots, I_2^{(h)}\} \\ & \dots\dots\dots \\ \text{Para } k = m & \quad \{I_m^{(1)}, I_m^{(2)}, \dots, I_m^{(h)}\} \end{aligned}$$

y sus correspondientes incorporaciones totales que representamos por:

$$\{I_1^D, I_2^D, \dots, I_m^D\}$$

cuya media, \hat{I}^D , y desviación típica, s_D , son:

$$\hat{I}^D = \frac{\sum_{k=1}^m I_k^D}{m} \quad s_D = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (I_k^D - \hat{I}^D)^2}{m-1}}$$

y la incertidumbre asociada a la media:

$$I^D = \hat{I}^D \pm t_{1-\alpha/2, m-1} \frac{s_D}{\sqrt{m}}$$

donde $t_{(1-\alpha)/2, m-1}$ corresponde a la t -Student para el nivel de significación α elegido con $m-1$ grados de libertad

Los valores $\{I_1^D, I_2^D, \dots, I_m^D\}$ siguen un distribución normal, no importa que funciones sean $f_i(a)$ y $g_i(w)$, y así lo consideraremos en adelante. En efecto: Sea \hat{I}_k^D la incorporación media del individuo k durante el periodo $[0, D]$, entonces $I_1^D = h \hat{I}_1^D, I_2^D = h \hat{I}_2^D, \dots, I_m^D = h \hat{I}_m^D$ verificándose que $\{I_1^D, I_2^D, \dots, I_m^D\} = h \{\hat{I}_1^D, \hat{I}_2^D, \dots, \hat{I}_m^D\}$ que para h elevado (> 30), de acuerdo con el teorema central del límite, siguen una distribución normal.

Ahora podemos estimar la probabilidad p de que la incorporación total I , durante un periodo $[0, D]$, para un individuo cualquiera del grupo estudiado exceda el límite L . Es decir: $P(I \geq L) = p$ y si queremos que $p = \alpha$ deberá cumplirse que:

$$\hat{I}^D + z_{1-\alpha} s_D = I_L \leq L \quad (5)$$

donde:

L Límite máximo de incorporación admisible. Habitualmente L es un fracción f

del LIA (límite de incorporación anual) aplicable al tipo de isótopos que forman los aerosoles inhalados.

$z_{1-\alpha}$ corresponde al valor de z de una normal $N(0,1)$ para el nivel de significación α elegido. Para $\alpha = 0.05$ $z_{0.95} = 1.649$.

Ejemplo 1: La norma 10CFR20.1502(b) dice que se requerirá mediciones para estimar la dosis interna a un individuo cuando es probable que éste exceda el 10% del LIA. La norma anterior es equivalente a calcular la probabilidad p de que I supere un determinado límite $L = f$ LIA, con $f = 0,1$ (10%), lo que puede hacerse aplicando (5). El LIA depende de los isótopos considerados, para el uranio ligeramente enriquecido es 1500 Bq, por tanto $L = 150$ Bq. El valor de α no está regulado, puede utilizarse $\alpha = 0.05$ que es frecuentemente utilizado en muchas aplicaciones estadísticas. Si el resultado obtenido es $I_L = L$, se considerará que es muy improbable que los individuos del grupo considerado supere el 10% del LIA.

Ejemplo 2: En la introducción indicábamos que debe considerarse trabajador profesionalmente expuesto de categoría B aquél que por las condiciones en las que realiza su trabajo es muy improbable que reciba dosis superiores a 3/10 de los límites anuales de dosis. Para saber si un grupo de trabajadores expuesto a la inhalación de aerosoles de uranio es de categoría B es aplicable un método idéntico al descrito en el ejemplo 1 con $L = 450$ Bq (Si consideramos sólo las dosis internas 3/10 del límite anual de dosis equivale a incorporar 3/10 del LIA, como el LIA es 1500, $L = 3/10 \cdot 1500 = 450$ Bq).

El procedimiento descrito lo hemos aplicado para estimar las incorporaciones de los trabajadores de un área de la fábrica de Juzbado de la que disponíamos los valores de A_{id} (mBq d^{-1}) de 2 años [Los valores realmente disponibles eran las concentraciones medias diarias C_{id} (Bq m^{-3}) pero de éstas se obtiene A_{id} (Bq día^{-1}) multiplicando el resultado por 9,6 de acuerdo a la ec (2)]. Hemos comprobado que se ajustan aceptablemente a una función lognormal $f_i(a) = \text{LN}(\mu_i, \sigma_i^2)$.

$$f_i(a) = \frac{1}{\sigma_i a \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln a - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \right]$$

con $a > 0$.

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_i \ln A_{id}$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N} \sum_i (\ln A_{id} - \mu_i)^2$$

Esto es bastante razonable pues cuando se trata de garantizar que una población esté por debajo de cierto límite, la media del valor a controlar debe estar sensiblemente alejada de éste presentándose una fuerte asimetría. La función lognormal cumple con estos criterios, probablemente se dé este tipo de distribución en casos similares. Un tema importante que se ha tenido cuenta en el tratamiento de los datos disponibles es la presencia de valores de $A_{id} \leq \text{LID}$ (LID = Límite Inferior de Detección de la técnica de medida). Para ello se ha desarrollado un método [1, 4], que se ha incorporado a un programa en *Mathematica*, que permite estimar la media y varianza en distribuciones normales y lognormales censuradas unilateralmente (fig.2).

No se tenían valores experimentales W_{id} . Se ha supuesto que los individuos se desplazan aleatoriamente por los n puntos siendo la probabilidad de permanecer en cada uno de ellos la misma. Podemos asumir, por tanto, que $g_i[w]$ corresponde a una distribución Uniforme $U_i(0,T)$. Debe verificarse que para una jornada cualquiera $\sum_{i=1}^m W_{id} = T$, siendo T la duración total de la jornada d que siempre es la misma, y por tanto sustituyendo en (4) resulta:

$$I_d^{(k)} = \nu T \sum_{i=1}^n \frac{U_i(0,1)^{(k)}}{\sum_{i=1}^n U_i(0,1)^{(k)}} \text{LN}[\mu_i, \sigma_i^2]^{(k)}$$

(6.a)

En el caso que se conozca los tiempos de permanencia y estos no varíen apreciablemente, podremos

considerarlos constantes. Es decir haremos $g_i[w] = W_i$, y de aquí resulta:

$$I_d^{(k)} = v \sum_{i=1}^n W_i \text{LN}[\mu_i, \sigma_i]^{(k)} \quad (6.b)$$

Una opción más restrictiva es elegir el valor mayor de los producidos cada día en todos los puntos de muestreo y aplicarla a toda la jornada.

$$I_d^{(k)} = v T \max_{1 \leq i \leq m} \left\{ \text{LN}[\mu_i, \sigma_i]^{(k)} \right\} \quad (6.c)$$

Existe una posibilidad aún más conservadora que es suponer que toda la actividad A_{id} depositada en cada filtro ocurre precisamente cuando el individuo está junto a él en cuyo caso.

$$I_d^{(k)} = v_i \sum_{i=1}^n \text{LN}[\mu_i, \sigma_i]^{(k)} \quad \text{pero} \quad \text{la} \quad \text{probabilidad} \quad \text{es} \quad \text{prácticamente} \quad \text{nula.}$$

El área elegida dispone de tres tomamuestras próximos (P_1 , P_2 y P_3) a los equipos de fabricación, y otro (P_A) representativo de la concentración media del área. Además se ha incluido un punto, P_F , con la concentración del fondo ambiental, que se ha utilizado para simular la exposición del trabajador durante el tiempo que pasa fuera de su área de trabajo. Las funciones a las que se ajustan estos valores C_{id} han sido las siguientes: $f_1(a) = \text{LN}(3.261, 1.262^2)$, $f_2(a) = \text{LN}(3.836, 1.546^2)$, $f_3(a) = \text{LN}(2.710, 0.879^2)$, $f_A(a) = \text{LN}(2.132, 0.684^2)$, y $f_F(a) = \text{LN}(1.954, 0.715^2)$

Aplicando la función de simulación (6.a) y multiplicando por 9.6, para pasar a A_{id} , se han obtenido los valores diarios de I_d que se muestran en la fig. 3. Se ha supuesto $D = 200$ jornadas, que son las típicas laborables de un año, y $m = 30$ individuos. La evolución de la cantidad incorporada por cada individuo se muestra en la figura 4. Puede observarse que al final del periodo las cantidades totales incorporadas son muy similares.

El valor obtenido para la media de incorporación anual, \hat{I}^D , ha sido 102.8 Bq y para la desviación típica, s_D , 17.7 Bq. Sustituyendo en (5) resulta $I_L =$

132 Bq. Como $L = 150$ Bq (véase ejemplo 1) se verifica que $I_L < L$. Por tanto, para este grupo, es muy improbable (<0.4%) que ningún individuo supere el 10% LIA, no requiriéndose de acuerdo a la norma 10CFR20.1502(b) mediciones individuales para estimar la dosis interna ni realizar bioensayos de forma sistemática (véase el punto 2.1.2 de [5]).

Lo anterior, aunque este basado en datos reales del pasado, debe entenderse como un ejemplo de aplicación del método propuesto y no corresponde a ningún grupo real de trabajadores de la Fabrica de Juzbado.

Si se dispusiesen de un gran número de valores reales de las incorporaciones diarias individuales podrían utilizarse éstos en vez de los simulados para calcular \hat{I}^D y s_D y aplicar (5). Sin embargo, nuestra experiencia nos dice que es preferible los obtenidos por simulación pues ésta utiliza los valores de A_{id} que son mucho más fiables que los datos de las incorporaciones individuales que presentan elevadas incertidumbres debida a la dificultad de registrar con precisión los tiempos de permanencia.

RETENCIÓN PULMONAR EN CASO DE MÚLTIPLES INCORPORACIONES ALEATORIAS

En este apartado desarrollaremos un método de cálculo de la retención pulmonar aplicable a casos de incorporaciones aleatorias de aerosoles radiactivos (el método es extensible para otros bioensayos como la excreción urinaria y/o fecal, empleando las funciones de eliminación correspondiente). El resultado nos valdrá para determinar la necesidad o no de realizar bioensayos y en los casos que sean necesarios definir frecuencia con la que debería realizarse.

Al igual que en el apartado anterior emplearemos un método de simulación que nos permite seguir la evolución de la retención pulmonar. Supondremos aerosoles de UO_2 , Clase Y, y AMAD $1 \mu m$, aunque es aplicable a otras solubilidades y AMADs, incluso a casos en los varíen [1, 6]. La retención pulmonar $q(t)$, donde t se expresa en días, para aerosoles de estas características supuesta una incorporación puntual única $I = 1$ en $t = 0$, puede aproximarse [1] bastante bien por:

$$q(t) = 0.1512^{-t/500} + 0.1252^{-t} \quad (7)$$

La cantidad total retenida $Q(t)$, con t en días, en un compartimento o región determinado (en este caso en los pulmones) en un periodo $[0, D]$ en el supuesto de que cada día se produce un incorporación puntual única, y asumiendo $Q(0)$ en $t = 0$, puede expresarse por:

$$\begin{aligned} \text{para } t = 1 & \quad Q^{(k)}(1) = I^{(k)}_0 q(1) \\ \text{para } t = 2 & \quad Q^{(k)}(2) = I^{(k)}_0 q(2) + I^{(k)}_1 q(1) \\ \text{para } t = 3 & \quad Q^{(k)}(3) = I^{(k)}_0 q(3) + I^{(k)}_1 q(2) + I^{(k)}_2 q(1) \\ & \dots\dots\dots \\ \text{para } t = d & \quad Q^{(k)}(d) = I^{(k)}_0 q(d) + I^{(k)}_1 q(d-1) + \dots + I^{(k)}_{j-1} q(2) + I^{(k)}_j q(1) \end{aligned}$$

Repetimos el proceso k veces utilizando los valores de $I^{(k)}$ obtenidos por el método descrito en el apartado anterior. De esta forma obtendremos las retenciones medias y sus correspondientes intervalo de confianza. Lo comparamos con el caso en el que la misma incorporación media $\hat{I} = I_D/D$ se produzca de forma continua constante. En este último caso $Q_c(t)$, está dada por (8), que se obtiene integrando (7). Los resultados se muestran en la figura 5.

$$Q_c(t) = \hat{I} (108.9 - 0.180 2^{-t} - 108.7 2^{-t/500}) \quad (8)$$

A partir de (8) puede determinarse el periodo en el que debería realizarse el bioensayo. En el punto 4.3 de [5] se dice: "En general, las muestras deberían ser realizados con una frecuencia correspondiente a no mas del 30% de incremento en las fracciones acumuladas sobre cualquier periodo de tiempo". El periodo Δt que debe transcurrir para que se produzca un incremento ΔQ en la cantidad retenida en los pulmones puede obtenerse conservadoramente aplicando (9).

$$\Delta Q = 100 \times \frac{Q(t_f) - Q(t_i)}{Q(t_i)} \quad (9)$$

donde $Q(t_i)$ y $Q(t_f)$ se calculan aplicando (8), siendo:

$Q(t_i)$ la cantidad retenida en t_i , siendo t_i el tiempo transcurrido desde que el inicio de la incorporación y la realización del bioensayo.

$Q(t_f)$ la cantidad retenida en t_f siendo $t_f = t_i + \Delta t$ donde Δt es el periodo que debe transcurrir para produzca el ΔQ establecido, expresada en porcentaje de $Q(t_i)$.

A partir de (9) se trata de determinar Δt lo que puede hacerse por un método numérico. Para $t_i = 600$ días se obtiene que $\Delta Q = 30\%$ cuando $\Delta t = 350$. Es decir: si se hace una medida con un CRC (Contador de radiactividad corporal) el día 600 desde el inicio de la incorporación la siguiente medida debería hacerse aproximadamente un año después. Pasados tres años de incorporación continua, y siempre que las condiciones no varíen apreciablemente, no es de esperar aumentos del 30% pues el incremento en la cantidad retenida en los pulmones se produce de forma muy lenta cuando el periodo es largo.

Otra información igualmente importante del método es que al conocer la retención estimada podemos saber si el resultado esperado está por encima del LID del equipo de medida (CRC) o si por el contrario queda por debajo de

este valor. Un CRC con un LID de 45 μg de ^{235}U (valor considerado bueno) sólo podrá detectar la presencia de uranio en el pulmón a un individuo que esté sometido a una incorporación anual media de 350 Bq ($\frac{1}{4}$ del LIA) durante más de 3 años. En el caso estudiado la incorporación media anual es menor de 132 Bq al individuo más expuesto, careciendo de utilidad el bioensayo. Aquí nos hemos referido a la retención pulmonar pero los criterios son los mismos para otros bioensayos.

CONCLUSIONES

Hemos mostrado un método que permite incorporar criterios estadísticos a la aplicación de controles ambientales y a la realización de bioensayos en personas expuesta profesionalmente a la inhalación de aerosoles radiactivos, el mismo procedimiento es extensible a otras situaciones. El empleo de este tipo de métodos permitiría aplicar con criterios más homogéneos y objetivos la normativa sobre Protección Radiológica.

REFERENCIAS

1. Sánchez J.G. *Variables estocástica en Modelos Compartimentales: Aplicación a la incorporación de partículas en el cuerpo humano*. Cap. 5. Tesis doctoral. Dpto. de Estadística. Universidad de Salamanca. 1998.
2. Law A. M. y David Kelton W. *Simulation, Modeling and Analysis*. McGraw-Hill. 1998.
3. Wolfram S. *The Mathematica Book, version 3 con Standard Add-on Packages*. Wolfram Media & Cambridge University Press. 1996.
4. González A. *Estimación de muestras censuradas y truncadas de distribuciones normales*. (Tesina). Dpto de Matemática Pura y Aplicada. Universidad de Salamanca. 1997.
5. USAEC. "Interpretation of bioassay data". Regulatory Guide 8.9. rev 1 (Draft). Marzo 1993.
6. Sánchez J.G. "Resolución analítica de modelos con recirculación: Aplicación al modelo de Wren de inhalación de partículas de uranio". 24 Reunión Anual de la SNE. Valladolid. 1998.

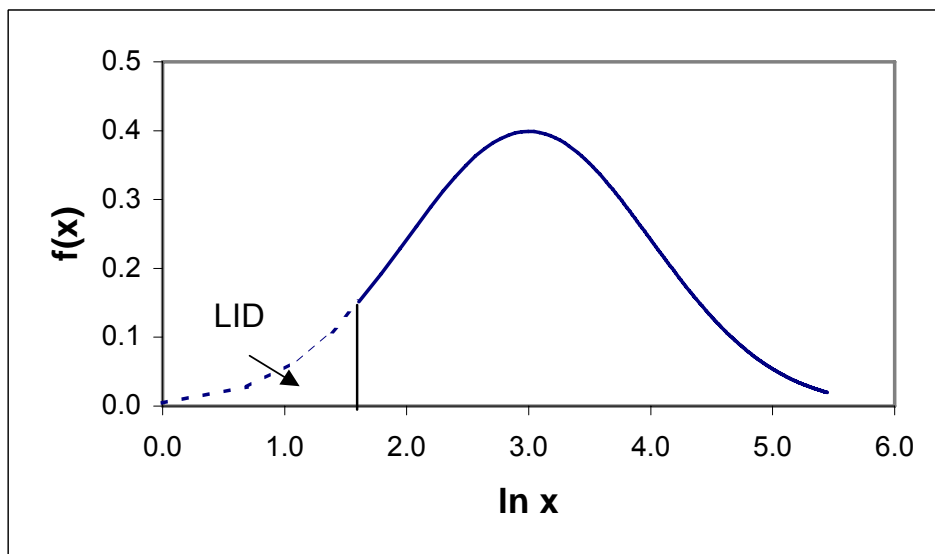


Figura 1. Función de densidad de una distribución normal de media 3 y desviación típica 1, siendo x una variable aleatoria que representa la variación de la concentración media diaria C_d en mBq/m^3 . Es equivalente a una distribución lognormal con variable aleatoria x . Algunos días $C_d < \text{LID}$ (Límite Inferior de Detección). Se trata de una distribución censurada unilateralmente. Este hecho lo hemos tenido en cuenta al estimar la media y varianza [1, 6].

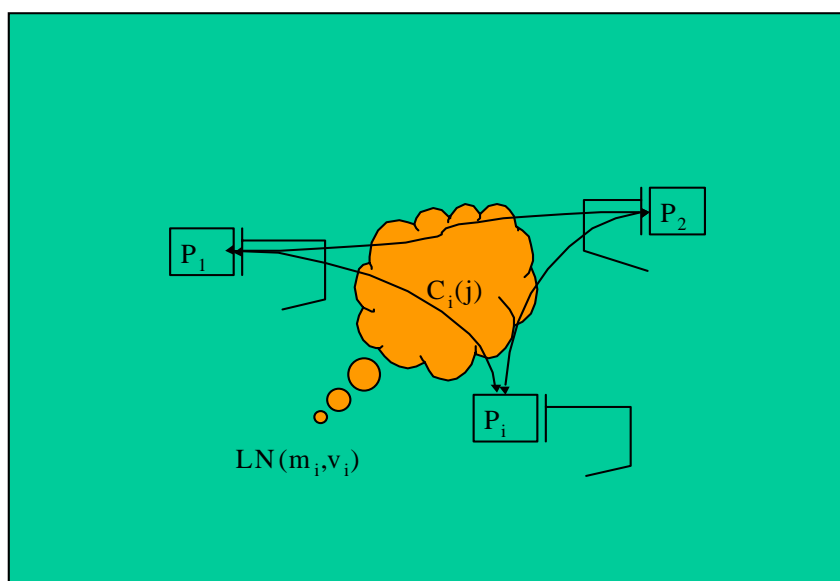


Figura 2. Los trabajadores se desplazan aleatoriamente por P_i puntos de muestreo dotados de tomamuestras que miden las concentraciones medias diarias, C_d , en dichos punto. Se ha encontrado que la concentración en cada punto i se puede ajustar a una distribución lognormal. Este hecho se ha utilizado para simular las incorporaciones a las que están sometidos.

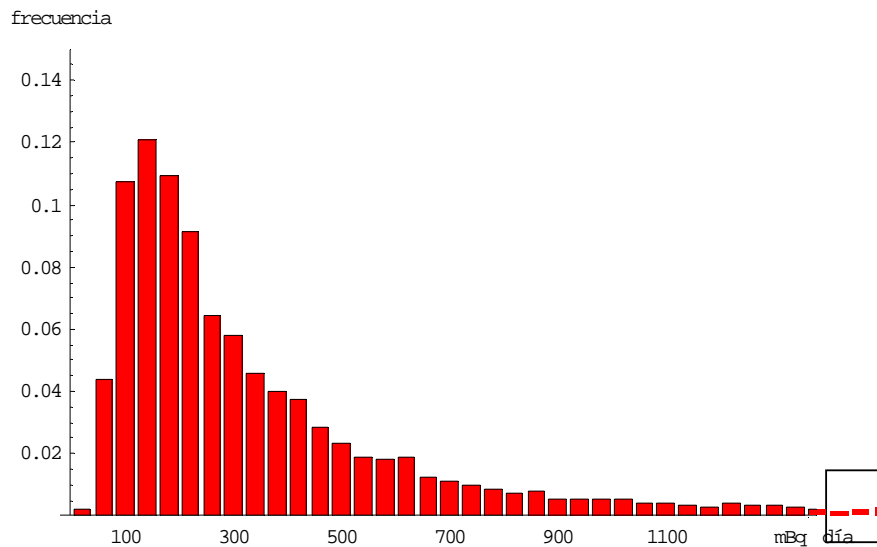


Figura 3. Distribución de frecuencias para las incorporaciones diarias I_d de un conjunto de trabajadores que se desplazan aleatoriamente por un área determinada. Puede observarse que presenta una fuerte asimetría a la izquierda. Esto es debido probablemente a que para garantizar que los trabajadores no superen un determinado límite es necesario que la mayoría de las exposiciones diarias estén muy alejada de los límites

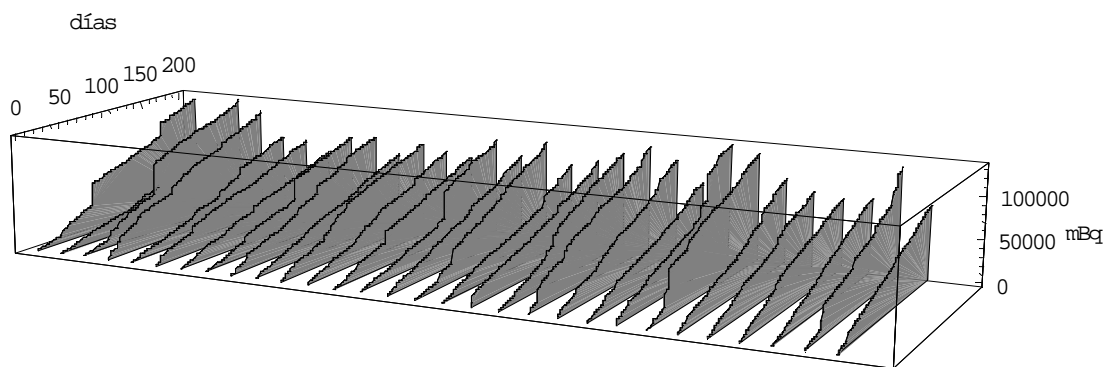


Figura 4. Simulación de las incorporaciones acumuladas individualmente a lo largo de un año laboral (200 días hábiles) para un colectivo de 30 trabajadores que realizan una actividad parecida. Obsérvese que la simulación prevé incorporaciones aleatorias puntualmente elevadas sin que al final del periodo se produzcan diferencias apreciables.

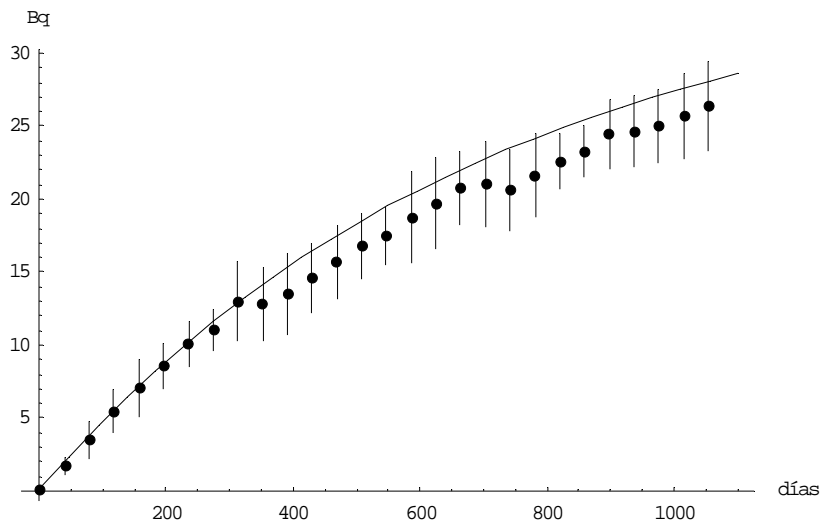


Figura 5. La línea discontinua representa la retención pulmonar media, con su intervalo de confianza, para un colectivo de trabajadores expuesto a una incorporación aleatoria. La disminución de la retención pulmonar que se produce anualmente coincidiendo con el periodo vacacional hecho que se ha tenido en cuenta la simulación. La línea continua representa el caso en el que la misma incorporación se produzca de forma continua constante, ésta normalmente sobrestima la cantidad retenida en los pulmones.