

ISSN 0327 - 0009

N° 13 - SETIEMBRE - 1988

9.88-57

BOLLETIN

BUENOS AIRES - ARGENTINA



SOCIEDAD ARGENTINA DE RADIOPROTECCION

Miembro de la International Radiation Protection Association

Conceptos básicos de contaminación interna

IneS Gomez Parada

INTRODUCCION

Durante el desarrollo de prácticas en las que se manipule material radiactivo en forma de fuentes no selladas, el personal involucrado está expuesto a posibles incorporaciones, esto es, a contaminarse internamente. Los radionucleidos incorporados se depositan, de acuerdo con su metabolismo, en órganos y tejidos. La energía liberada por desintegración de los radionucleidos se absorbe en el mismo órgano de depósito en el caso de radiación alfa y beta. En el caso de radiación gamma, prácticamente todo el cuerpo resulta irradiado.

Las Normas Básicas de Seguridad en Materia de Protección Radiológica (publicación 9 de la serie seguridad del OIEA) y las Normas Básicas de Seguridad Radiológica aprobadas por el Consejo Asesor para el Licenciamiento de Instalaciones Nucleares establecen que el límite anual de dosis equivalente efectiva deberá aplicarse a la suma de las dosis equivalentes efectivas resultantes de las exposiciones externas durante un año,

y a las dosis equivalentes efectivas para toda la vida (para los trabajadores ese período se considera de 50 años) resultantes de la incorporación de radionucleidos durante ese año.

Según el tipo de tareas que realice, el trabajador estará expuesto a recibir dosis por irradiación externa o por contaminación interna en distinta proporción. Es necesario entonces que el responsable de la vigilancia ocupacional tenga muy presente la necesidad de adicionar las dosis recibidas por irradiación externa y por contaminación interna, de forma que su suma se mantenga dentro de los límites establecidos por la Autoridad.

Efectos estocásticos y no estocásticos

Los efectos producidos por la radiación en los seres vivos pueden clasificarse en estocásticos y no estocásticos.

Son efectos estocásticos aquéllos en los que su **probabilidad** de ocurrencia es función de la dosis sin que se presente un umbral en dicha función, de forma tal que aún a muy bajas dosis existe una cierta probabilidad de ocurrencia del efecto. (Ej.: carcinogénesis, efectos hereditarios).

Son efectos no estocásticos aquéllos en los que la **severidad** del daño es función de la dosis. Para que tenga lugar un determinado efecto no estocástico la dosis involucrada debe ser mayor que un cierto valor, o sea, se presenta un umbral en la relación dosis-respuesta. (Ej.: síndrome agudo de irradiación, producción de cataratas, eritema).

El objeto de la protección radiológica es evitar los efectos no estocásticos y reducir la probabilidad de los estocásticos a niveles aceptables.

Dosis equivalente efectiva integrada durante 50 años

El concepto de **Dosis Equivalente Efectiva Integrada durante 50 años** es fundamental para interpretar las normas vigentes en protección radiológica.

Para entender su significado hay que tener en cuenta que el radionucleido incorporado se mantiene en el organismo durante un cierto tiempo, el que -suponiendo una función exponencial- es teóricamente infinito. Esta función dependerá en realidad del comportamiento metabólico del elemento químico en cuestión, es decir, de la forma de su eliminación de los distintos órganos o tejidos y del propio decaimiento físico del radionucleido. Un parámetro que permite cuantificar esto, en el caso de poder aceptarse una función exponencial, es el período efectivo (T_{ef}), definido para un órgano, tejido o para retención en todo el cuerpo según interese.

Se expresa como:

$$T_{ef} = \frac{T_f \cdot T_b}{(T_f + T_b)}$$

donde T_b es el período de retención biológica y T_f es el período de semidesintegración del radionucleido.

Se asocia al período efectivo del radionucleido la constante de decaimiento efectiva, λ_{ef} por la expresión:

$$\lambda_{ef} = \ln 2 / T_{ef}$$

La **Integral de Dosis Equivalente Efectiva** se define por la expresión:

$$H_{E,t} = \int_{t_0}^{t_0+t} H_E(t) dt$$

donde t_0 es el tiempo en que se produce la incorporación, $H_E(t)$ es la tasa de dosis equivalente efectiva y t es el intervalo de tiempo en que se quiere calcular la dosis acumulada.

En el control ocupacional t se considera 50 años, para contemplar la situación más desfavorable de que la incorporación se produzca al comienzo de la vida laboral. Se llega entonces a la expresión de Dosis Equivalente Efectiva Integrada a 50 años:

$$t_0 + 50 \text{ años}$$
$$H_{E,50} = \int_{t_0}^{\cdot} \dot{H}_E(t) dt$$

$H_{E,50}$ representa entonces, la dosis equivalente efectiva acumulada en los 50 años posteriores a la incorporación.

SISTEMA DE LIMITACION DE DOSIS

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (la sigla en inglés es ICRP) ha recomendado un límite anual de dosis para trabajadores expuestos a las radiaciones ionizantes con el objeto de equipararlos, en cuanto a potenciales riesgos, a los de las industrias convencionales consideradas seguras.

El límite primario para la protección contra riesgos estocásticos es 0.05 Sv (5 rem) de Dosis Equivalente Efectiva (H_E) por año. Con el objeto de limitar la ocurrencia de efectos no estocásticos, ese límite anual se complementa limitando la dosis equivalente en un órgano o tejido en particular a 0.5 Sv (50 rem), con excepción de la del cristalino que se limita a 0.15 Sv (15 rem).

En el caso específico del control de la contaminación interna, la incorporación del material radiactivo

en los trabajadores debe cumplir las siguientes condiciones:

$$\sum_t w_t H_{50,t} \leq 0.05 \text{ Sv}$$

para todo el cuerpo (donde w_t es un factor de ponderación que representa la proporción del riesgo estocástico correspondiente al tejido t , con respecto al riesgo total cuando todo el cuerpo es irradiado uniformemente)

$$y \quad H_{50,t} \leq 0.5 \text{ Sv}$$

para un dado órgano excluyendo el cristalino.

Límite anual de incorporación (ALI)

En base a los límites primarios establecidos, se define un límite secundario de utilidad práctica para el diseño de instalaciones y para el control de las condiciones de trabajo: el Límite Anual de Incorporación. Se lo representa por su sigla en inglés: ALI, Annual Limit on Intake.

El ALI se define como la actividad de un radionucleido que, de ser incorporado produce una dosis equivalente efectiva integrada durante 50 años de 0.05 Sv en todo el cuerpo o 0.5 Sv en un órgano o tejido particular. Como las dos relaciones limitantes expuestas anteriormente deben cumplirse simultáneamente, el ALI será el valor que resulte más limitante. Esto significa que la incorporación en algunos radionucleidos puede estar limitada por el riesgo estocástico y en otros por el riesgo no estocástico. En las tablas de la publicación 30 del ICRP, por ejemplo, aparece el órgano o tejido limitante bajo el valor del ALI correspondiente cuando se ha calculado por el riesgo no estocástico. En esos casos aparece también, entre paréntesis, el valor correspondiente al ALI calculado en base a la dosis equivalente efectiva integrada durante 50 años en todo el cuerpo.

Para interpretar correctamente el significado del límite anual de incorporación es útil referirse al gráfico 1. Suponemos que durante 50 años una persona trabaja en condiciones tales que incorpora un ALI por año. El primer año, esa incorporación le producirá una dosis equivalente efectiva representada en la figura por el área A. El segundo año, la incorporación de otro ALI le producirá una dosis igual que se sumará a la dosis correspondiente a la cantidad de radionucleido que está retenido en su organismo, proveniente del primer ALI (área B). El tercer año, recibirá una dosis suma de la correspondiente a un nuevo ALI más las contribuciones del remanente de los dos años anteriores (áreas B y C). Continuando con el mismo razonamiento, se ve en el gráfico que se llega a un valor estacionario de dosis anual ($A + B + C + D$) en el caso de que la retención del radionucleido sólo lleve a valores significativos hasta 3 años posteriores a la incorporación.

El ALI para un radionucleido se fija de manera tal que esta dosis anual estacionaria se mantenga por debajo de 0.05 Sv (en el caso de que se trate de irradiación de todo el cuerpo).

Es evidente que para un radionucleido de período efectivo corto (≤ 1 año), el valor límite se alcanza luego de pocos años posteriores a la incorporación. Para un radionucleido de período efectivo largo, del que se incorporan valores de ALI en forma continua, durante los primeros años se recibirán dosis anuales menores, y sólo al final de la vida laboral podrá eventualmente alcanzarse los 0.05 Sv por año.

Aunque este artículo se refiere sólo a temas de control de la contaminación interna, es necesario recordar, tratando el tema de límite de dosis, que un trabajador puede irradiarse externamente a la vez que sufrir una contaminación interna. En ese caso, la relación limitante es:

$$H_{I,d} / 0.05 \text{ Sv} + \sum_j I_j / \text{ALI}_j \leq 1$$

donde $H_{I,d}$ es el índice profundo de dosis equivalente (por irradiación externa) e I_j / ALI_j es la fracción de ALI incorporada en el año para un radionucleido j .

Según el tipo de tarea específica que realiza, será más probable que un trabajador reciba dosis por irradiación externa o por contaminación interna. De cualquier forma, ambas deben ser tenidas en cuenta, sobre todo en tareas especiales. Por ejemplo, trabajadores que son controlados rutinariamente por irradiación externa, pueden incorporar material radiactivo en el curso de una tarea no rutinaria y recibir por ello dosis que por supuesto deben ser también registradas.

Límites derivados

Los límites primarios y secundarios propuestos por el ICRP (por ejemplo, los límites de dosis equivalentes y los ALIs) son valores de magnitudes difíciles de ser medidas directamente. La relación entre las mediciones realizadas y estos límites, no es, en la mayoría de los casos simple de establecer. Siempre es necesario un modelo, más o menos complejo, que permita interpretar las mediciones efectuadas. Estos modelos, basados en conocimientos científicos generalizados mediante el uso de parámetros standard, tienen limitaciones que, de no ser tenidas en cuenta, pueden llevar a resultados erróneos.

Se llaman **Límites Derivados** a los valores de aquellas magnitudes relacionadas con los límites primarios mediante la aplicación de un modelo definido de manera tal que, si ellos son observados, es altamente probable que los límites primarios también sean respetados.

La bondad de la correspondencia depende de cuanto se aproxima el modelo usado a la situación real.

CONCENTRACION DERIVADA EN AIRE (DAC)

Un límite derivado es la Concentración Derivada en Aire. Se lo expresa por su sigla en inglés, DAC, (Derived Air Concentration).

El DAC está concebido como una guía para controlar la exposición a radionucleidos en el ambiente de trabajo.

Se define en base al ALI por medio de la siguiente expresión:

$$\int_0^{1 \text{ año}} C(t) B(t) dt \leq \text{ALI}$$

donde $C(t)$ es la concentración de un radionucleido en el aire a un tiempo t , expresada en Bq por m^3 , y $B(t)$ es el volumen de aire respirado por el trabajador por unidad de tiempo, expresado en m^3 por unidad de tiempo.

La integración se hace sobre un año de trabajo.

$B(t) = 0.02 \text{ m}^3$ por minuto (que es el volumen por minuto que inspira el hombre de referencia en condición de "actividad ligera", según el ICRP 23) y un año de trabajo de 2000 horas (50 semanas de 40 horas).

De acuerdo a esto, resulta:

$$\text{DAC} = \text{ALI} / 0.02 \times 2000 \times 60 \quad \text{Bq/m}^3$$

$$\text{DAC} = \text{ALI} / 2.4 \times 10^3 \quad \text{Bq/m}^3$$

en ambos casos el ALI está expresado en Bq por año.

Vale la pena hacer notar que el ALI es el valor realmente limitante y que el DAC, por los supuestos usados en su determinación, tiene el valor de una guía solamente. Surge de su definición que la exposición a valores superiores a un DAC por períodos cortos de tiempo puede ser aceptable, siempre que en el resto del año la concentración en aire sea proporcionalmente menor como para que la inhalación anual total sea menor que un ALI.

LIMITE ANUAL DE EXPOSICION (LAE)

Un límite derivado de gran utilidad es el Límite Anual de Exposición (LAE). Se utiliza para limitar la permanencia de un trabajador en un lugar en el que puede contaminarse internamente por inhalación, ya sea en el caso de una intervención o para limitar el factor ocupacional anual en recintos de alto riesgo.

Por exposición se entiende, en este caso, la integral en el tiempo de la concentración del radionucleido en el aire, de forma que sus unidades son Bq.h/m³.

El valor numérico del LAE se obtiene integrando en un año (2000 horas de trabajo) una concentración de un DAC.

O sea:

$$\text{LAE [Bq.h/m}^3 \text{]} = \text{DAC} \times 2000 = \text{ALI}/1.2 \text{ [Bq.h/m}^3 \text{]}$$

El LAE tiene la ventaja sobre el DAC de tener en cuenta el factor ocupacional. Esto debe interpretarse de la siguiente manera: un trabajador, respirando en un ambiente con una concentración de un ALI por m³, podría

permanecer hasta una hora sin sobrepasar su límite anual. Si la concentración fuera de 2 ALI por m^3 , solo podría trabajar media hora. Por el contrario, si utilizara una protección respiratoria que redujera 20 veces la concentración del aire que respira, su permanencia podría extenderse a 20 horas.

En la utilización de estos límites, hay que tener muy en claro que están fijados para limitar los riesgos provenientes exclusivamente de la irradiación de los nucleidos incorporados. Deben tenerse en cuenta entonces, para limitar la exposición ocupacional, otros factores, como la toxicidad de los compuestos incorporados, que en algunos casos son mucho más limitantes.

CALCULO DE DOSIS DEBIDAS A CONTAMINACIONES INTERNAS

En los próximos párrafos se tratará de presentar la metodología desarrollada por el ICRP para evaluar las dosis en órganos y tejidos debidas a la incorporación de radionucleidos.

TERMINOLOGIA USADA EN LA EVALUACION DE LA CONTAMINACION INTERNA

Antes de entrar en la descripción de la metodología de cálculo, es útil definir términos que tienen un significado específico en el área de las estimaciones de dosis debidas a la contaminación interna.

Incorporación (intake): Actividad que ingresa al organismo. Las posibles vías de entrada son: inhalación, ingestión, absorción a través de la piel, heridas.

Incorporación Sistémica (uptake): Actividad que pasa al líquido extracelular. Tiene lugar luego de la incorporación y se realiza fundamentalmente desde los órganos

de depósito hacia la sangre. Puede ser casi instantánea, como en el caso del yoduro o agua tritiada, o tardar años, como en el caso del óxido de plutonio.

Depósito: Actividad que se deposita en un órgano o tejido determinado.

Retención: Fracción de la actividad depositada presente en un órgano o tejido o en todo el cuerpo en función del tiempo.

Eliminación: actividad que abandona un órgano o tejido.

Excreción: Actividad que sale del organismo. (Fecal, urinaria, transpiración, exhalación).

Mediciones directas: las que se realizan desde el exterior sobre todo el cuerpo o parte de él para el caso de emisores α o gamma.

Mediciones indirectas: las que se realizan sobre excretas u otros materiales biológicos.

METODOLOGIA DE CALCULO

Para evaluar dosis en tejidos u órganos es necesario conocer las funciones de retención del elemento químico al que pertenece el radionucleido en cuestión. Estas funciones son, en general, del tipo exponencial o suma de exponenciales con distintas constantes. Para determinarlas, se plantean modelos matemáticos de tipo compartimental con coeficientes de transferencia constantes que describen, en forma aproximada, procesos reales generalmente complejos. Estos modelos dan lugar a sistemas de ecuaciones diferenciales de primer orden con coeficientes constantes, de cuya resolución surgen las ecuaciones de retención y las de excreción urinaria y fecal. Estas últimas funciones tienen particular impor-

tancia pues permiten estimar el valor de una incorporación a partir de mediciones en excretas. Esta es la base de algunos planes de control ocupacional.

El número de compartimientos utilizados en un modelo depende de la mayor o menor aproximación con que se quiera representar el proceso real. Los parámetros se obtienen de la experiencia animal o de casos humanos estudiados. Para fines normativos, se usan los parámetros ya estimados para el hombre de referencia. En evaluaciones dosimétricas particulares (accidentes, evaluaciones médicas) puede ser necesario, según sea la exactitud deseada en la estimación, fijarlos en cada caso particular. Es evidente que, dadas las diferencias individuales (metabólicas, peso y tamaño del órgano, hábitos alimenticios, etc.), los parámetros establecidos para el hombre de referencia pueden alejarse bastante de los reales en cada caso.

En la publicación 30 del ICRP se encuentran modelos metabólicos, los parámetros de transferencia del hombre de referencia y la metodología de cálculo para la evaluación de dosis por contaminación interna.

Como ilustración de la aplicación de un modelo compartimental para encontrar ecuaciones de retención y eliminación, podemos ver uno de los planteados para el metabolismo del yodo en el hombre adulto.

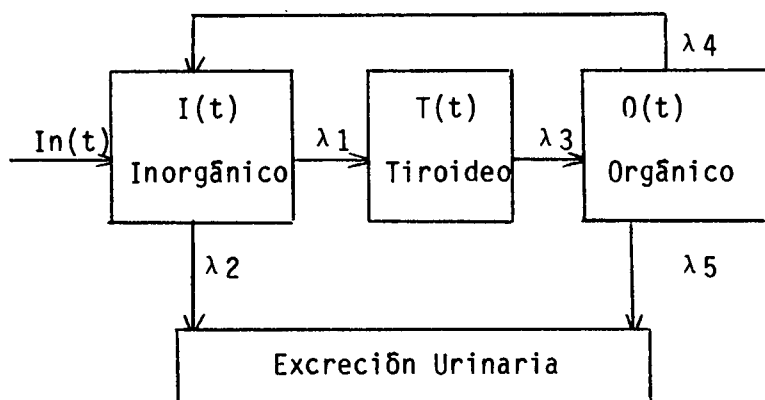
En este modelo se utilizan tres compartimientos: inorgánico, tiroideo y orgánico.

Compartimiento inorgánico: formado por todo el yodo extratiroideo que no está ligado a moléculas orgánicas, que puede ser excretado o captado por la tiroides para ser convertido en yodo orgánico.

Compartimiento tiroideo: formado por todo el yodo presente en la tiroides.

Compartimiento orgánico: formado por todo el yodo extratiroideo, ligado a moléculas orgánicas, que puede ser excretado o convertido nuevamente en yodo orgánico.

En la siguiente figura se esquematiza el modelo:



La excreción por transpiración, exhalación y por heces no ha sido considerada en este modelo pues solo representa un porcentaje muy pequeño de la excreción total y su inclusión no influye apreciablemente en los resultados. Los valores de las constantes de las funciones de transformación y excreción que aparecen en la próxima tabla son estimaciones que corresponden a personas adultas con función tiroidea normal.

λ_i (en 1/día)

λ_1	0.93
λ_2	1.92
λ_3	0.0087
λ_4	0.053
λ_5	0.0050

Las tres ecuaciones diferenciales para este modelo son:

$$dI(t)/dt = -(\lambda_1 + \lambda_2) I(t) + \lambda_4 O(t) + X(t) \quad (\text{C.inorg.})$$

$$dT(t)/dt = \lambda_1 I(t) - \lambda_3 T(t) \quad (\text{C.tiroideo})$$

$$dO(t)/dt = \lambda_3 T(t) - (\lambda_5 + \lambda_4) O(t) \quad (\text{C.orgánico})$$

$$Eu(t) = \lambda_2 I(t) + \lambda_5 O(t) \quad (\text{Excreción urinaria})$$

(En estas ecuaciones no se ha tenido en cuenta el decaimiento radiactivo. Para considerarlo, basta multiplicar los resultados por el factor $e^{-\lambda_f t}$, donde λ_f es la constante de decaimiento físico que corresponde al isótopo del yodo que se considere).

La solución analítica de este sistema de ecuaciones, con condiciones iniciales adecuadas, da las funciones de retención y de eliminación urinaria.

Sin entrar en los detalles específicos del cálculo, se puede decir que una incorporación sistémica origina un depósito en órganos o tejidos. Cada uno de ellos se comportará como una eventual fuente de irradiación para los órganos o tejidos circundantes, y por supuesto para sí mismo.

Al órgano que irradia se lo llama fuente (S), y a los irradiados, blanco (T).

Para cada tipo de radiación i , de un radionucleido j localizado en un órgano fuente S, la dosis equivalente integrada durante 50 años $H_{50,j}$, en un órgano blanco T, es el producto de dos factores:

1) El número total de desintegraciones del nucleido j en S durante 50 años. Se lo indica como U_S .

2) La energía absorbida por unidad de masa en T, aplicando el factor Q correspondiente al tipo de radiación i emitida por desintegración del nucleido j en S. Se la expresa como SEE(T + S).

En general, las ecuaciones de retención tienen la forma:

$$r(t) = R(t) e^{-\lambda_f t}$$

Donde R(t) es la ecuación de retención biológica que surge de la resolución de las ecuaciones planteadas en base a los modelos compartimentales, y λ_f es la constante de decaimiento físico del radionucleido.

Al expresar R(t) como suma de exponenciales y multiplicarla por la exponencial del decaimiento físico, aparece la constante de decaimiento efectiva ya definida λ_{ef} .

Hay que hacer notar que la integración se hace a 50 años, ya que el límite derivado (ALI) está calculado de esa forma para el control ocupacional. Para estimaciones particulares, el límite de integración se extiende al período de tiempo que se considere de interés.

La energía específica efectiva (en Mev g⁻¹ por desintegración) para un radionucleido j, con distintos tipos de emisiones, se expresa como:

$$SEE(T + S) = \sum_i Y_i E_i AF(T + S)_i Q_i / M_T \text{ (Mev/g trans)}$$

donde la sumatoria i se extiende a todas las radiaciones producidas por cada desintegración del nucleido j en el órgano fuente S.

Y_i es el rendimiento de la radiación i por transformación del radionucleido j (probabilidad de cada tipo de emisión).

E_i , expresada en Mev, es la energía de la radiación i , ya sea la única o la promedio según corresponda por el esquema de desintegración del radionucleido en cuestión.

$AF(T+S)$ es la fracción de energía absorbida en el órgano T por emisión i en S. Para la mayoría de los órganos, se supone que la energía alfa y beta se absorben por completo en el órgano fuente. Son excepciones el hueso mineral y el contenido de los órganos del tracto gastrointestinal. La fracción absorbida de energía gamma se estima en base a valores de fracción absorbida específica, por gramo de tejido blanco, presentados en el ICRP 23.

Q_i es el factor de calidad apropiado para la radiación i .

M_T es la masa del tejido blanco expresada en gramos. (Para el hombre de referencia aparecen en la publicación 23 del ICRP).

En la estimación de la dosis integrada durante 50 años en un órgano blanco dado, hay que tener en cuenta todos los tipos de emisiones del radionucleido j , todos los radionucleidos presentes en el órgano fuente y todos los órganos fuente que se encuentren irradiando al órgano blanco.

En la publicación 30 del ICRP, aparecen tabulados valores de U_S por unidad de incorporación en diferentes órganos fuentes, y valores de $SEE(S+T)$ para los órganos fuente y blanco de interés para cada radionucleido.

MODELOS DOSIMETRICOS

Como se ha dicho, los modelos matemáticos utilizados en la evaluación de la contaminación interna se han de-

sarrollado con el objeto de describir la distribución de los radionucleidos en el organismo y predecir el depósito, retención y eliminación de los mismos.

Se han establecido en base al seguimiento de estudios diagnósticos médicos, de incorporaciones accidentales y a la experimentación animal. En la publicación 30 del ICRP se describe un modelo para incorporación por vía inhalatoria (modelo pulmonar), otro para incorporación por ingestión (modelo gastrointestinal) y otro para dosimetría de hueso (modelo óseo).

MODELO DOSIMETRICO PARA EL SISTEMA RESPIRATORIO

Este modelo dosimétrico se aplica para el caso de inhalación de aerosoles radiactivos. Fue propuesto por el Grupo de Trabajo en Dinámica Pulmonar del ICRP (Task Group on Lung Dynamics) en 1966. Está vigente actualmente, aunque sujeto a revisión.

Hay que tener presente que sus parámetros están ajustados sólo para el caso de respiración normal (nasal).

De acuerdo a este modelo se divide al sistema respiratorio en cuatro regiones anatómicas. La región **naso-faríngea** (N-F), que se extiende hasta el nivel de la laringe; la región **tráqueo-bronquial** (T-B), que comprende los conductos desde la laringe hasta el fin de los bronquolos terminales; la región **pulmonar** (P), que incluye el parénquima pulmonar; y la región **linfática**, formada por los **nódulos linfáticos**.

Depósito

Producida la incorporación por vía inhalatoria de un material radiactivo, el depósito en cada una de estas

regiones dependerán de las propiedades aerodinámicas del aerosol. Partículas de mayor tamaño quedarán retenidas en las vías aéreas superiores, mientras que las más pequeñas llegarán hasta pulmón profundo. Se considera que los diámetros de partículas de un aerosol se ajustan a una distribución log-normal, de forma tal que un aerosol se ve completamente caracterizado por su media geométrica y por su desviación estandar geométrica. Cuando la determinación de los tamaños se hace por medio de las propiedades aerodinámicas de las partículas y la medición de la actividad, se determina el Diámetro Aerodinámico Medio por Actividad. Se usa hacer referencia a este parámetro por su sigla en inglés, AMAD, (Activity Median Aerodynamic Diameter).

Los porcentajes de material inhalado depositado en cada zona del tracto respiratorio varían de acuerdo al AMAD del aerosol. Para el caso de AMAD = 1 micrón y cuando el individuo se encuentra en el estado llamado de actividad ligera, donde el volumen respirado se considera 20 l/minuto, se estimó:

Depósito en región N-F	30%
Depósito en región T-B	8%
Depósito en región P	25%

(El resto es exhalado)

La variación de estos porcentajes en función del tamaño del aerosol se muestra en el gráfico 2.

Este modelo pulmonar vale para aerosoles de AMAD comprendidos entre 0,2 y 10 micrones, con desviación estandar geométrica menor que 4,5. Con las líneas punteadas se indican valores de depósito provisorios para un rango más extenso de tamaños. En una distribución de AMAD mayor que 20 micrones, se supone su depósito total en la zona naso-faríngea. Para valores de AMAD menores de 0.1 micrón, el modelo no tiene validez.

A los efectos normativos de protección de trabajadores o cuando se desconoce la distribución real del aerosol inhalado, se supone, como valor standard, un AMAD de 1 micron. De cualquier forma, para cálculos que requieran mayor aproximación, se recomienda efectuar la caracterización del aerosol involucrado en cada caso.

Depuración

El material incorporado por vía inhalatoria se elimina de los órganos o tejidos de depósito por tres vías:

- Pasaje al tracto gastrointestinal
- Pasaje a sangre
- Pasaje al tejido linfático

Las cantidades relativas que se vehiculizan por una u otra vía, así como las velocidades de transferencias, están especificadas en el modelo, pero debe tenerse muy en cuenta que estos son parámetros standard que en la mayoría de los casos particulares, no se ajustan suficientemente a la realidad.

En los alvéolos pulmonares se efectúa el intercambio de gases y el pasaje del material depositado del pulmón a la sangre. El modelo pulmonar propuesto por el ICRP clasifica los compuestos en tres clases, de acuerdo a su mayor o menor velocidad de pasaje a la sangre desde el pulmón: D, W e Y.

Son compuestos clase D (días) aquéllos en que el tiempo medio de transferencia es menor que 10 días. Son muy solubles en los fluidos biológicos y se los denomina también muy transferibles.

Los compuestos clase W (week = semana) tienen tiempo medio de transferencia del orden de semanas y menor que

100 días. Se los puede considerar medianamente transferibles.

Los compuestos clase Y (year = año) son los que se retienen por más tiempo en el pulmón. El tiempo medio de transferencia es para ellos del orden de años (mayor de 100 días). Se los llama también poco transferibles.

Si el material depositado en los alveolos pulmonares es transferible (D o W), puede ser completa y rápidamente transferido al torrente sanguíneo. Si es poco transferible o clase Y, la limpieza del pulmón profundo se realiza fundamentalmente por dos procesos: por acción ciliar y descamación de la capa mucosa, y por fagocitosis. Por el primero de los procesos, las células alveolares descamadas y el material depositado son arrastrados por el fluido que cubre las membranas alveolares hacia la capa mucosa de los bronquiolos terminales. En el proceso de fagocitosis, los fagocitos envuelven las partículas de material depositado llevándolas hacia el sistema linfático (ganglios y linfa) o, por el mecanismo anterior, a los bronquiolos terminales.

Como la clasificación de los compuestos en las tres clases mencionadas no supone una separación neta, sino que se tiene más bien un gradiente de solubilidad, los tres mecanismos de limpieza pueden tener lugar al mismo tiempo, dependiendo del grado de transferibilidad del compuesto la preeminencia de uno sobre otro.

Del material que llega a los nódulos linfáticos se considera que la mayor parte se vehiculiza a la sangre, y una menor proporción se retiene en forma indefinida.

En el gráfico 3 se trata de esquematizar los sitios de depósito y los procesos de depuración.

MODELO DOSIMETRICO PARA EL TRACTO GASTROINTESTINAL

El tracto gastrointestinal (TGI) puede verse contaminado por la ingestión de una sustancia radiactiva o por el material derivado por acción ciliar desde el tracto respiratorio.

Dado que en el caso de ingestión el material incorporado está en forma líquida o sólida, su tiempo de residencia en la faringe y el esófago es corto, de manera que la dosis en esos órganos no resulta significativa. Esto hace que no se considere, a los fines de radioprotección, ningún órgano anterior al estómago en el modelo dosimétrico del aparato digestivo.

Este modelo divide al aparato digestivo en cuatro secciones:

- Estómago (E)
- Intestino Delgado (ID)
- Intestino Grueso Superior (IGS)
- Intestino Grueso Inferior (IGI)

En el gráfico 4 se esquematiza el modelo.

Si el material es no transferible, la mayor parte se vehiculizará a lo largo del sistema digestivo y se excretará. En ese caso, la mucosa intestinal recibirá la mayor dosis. Si el material es transferible, parte de él se absorberá a nivel del ID pasando al líquido extracelular. El factor que representa la fracción que pasa a ser incorporación sistémica se designa f_1 . Este factor está tabulado para distintos compuestos de elementos individuales.

Para el cálculo de la dosis equivalente integrada a 50 años en una sección cualquiera del TGI, se sigue la metodología general ya planteada. La integración para el cálculo de U_S se extiende al tiempo de residencia

del material incorporado en las distintas secciones del TGI, que resulta ser del orden de horas.

En el cálculo de SEE, se considera fuente el contenido de los órganos, y blanco, la pared de los mismos para radiaciones penetrantes y las capas mucosas en el caso de radiaciones no penetrantes.

MODELO DOSIMETRICO PARA HUESO

En el esqueleto se distinguen dos tipos de tejido óseo: el cortical, que es tejido óseo compacto, y el trabecular, que es tejido óseo esponjoso.

En la superficie del hueso residen las células responsables de su crecimiento. Se llama periostio al recubrimiento de la parte externa y endostio al de la interna. El endostio forma pliegues siguiendo las trabéculas y tiene, por lo tanto, una superficie mucho mayor que el periostio.

En el interior de los huesos del tronco y la cabeza se encuentra la mayor parte de la médula roja activa.

A los efectos de la protección radiológica, hay que señalar que las células sobre las cuales existe riesgo carcinogénico en el esqueleto son las que forman parte del sistema hematopoyético (precursor de células sanguíneas) y las células osteogénicas (generadoras de hueso). De esta manera, los tejidos sobre los que se enfoca el cálculo dosimétrico son la médula roja y la superficie de hueso.

Para los cálculos de dosis, se consideran por separado aquellos radionucleidos que se distribuyen en todo el volumen del hueso (Ej.: Ra-226) y aquellos cuyo depósito es a nivel de la superficie del hueso (Ej.: Pu-239).

La decisión sobre la ubicación de cada radionucleido en uno de estos dos grupos se presenta en la publicación 30 del ICRP en la parte de datos metabólicos.

En el modelo dosimétrico se han adoptado criterios de simplificación en cuanto al tamaño y posición de los dos tejidos blancos.

Con estas consideraciones, se encaran los cálculos con el formalismo ya planteado. El problema fundamental que se presenta es la determinación de SEE, dado el íntimo contacto entre tejidos blancos y fuentes.

Para emisores gamma, los datos necesarios para su determinación están presentados en ICRP 23 para médula roja y superficie ósea como órganos blanco, siendo órgano fuente cualquiera que haya incorporado el radionucleido.

Para emisores alfa y beta, se tratan por separado los radionucleidos que se distribuyen en volumen o en superficie. Serán órganos fuente el hueso cortical y el trabecular, y se remite como referencia a la publicación 30 del ICRP, para encontrar los valores particulares de SEE para las distintas emisiones y combinaciones de órganos blanco y fuente.

* * *

DISTRIBUCION DE LOS RADIONUCLEIDOS EN EL ORGANISMO

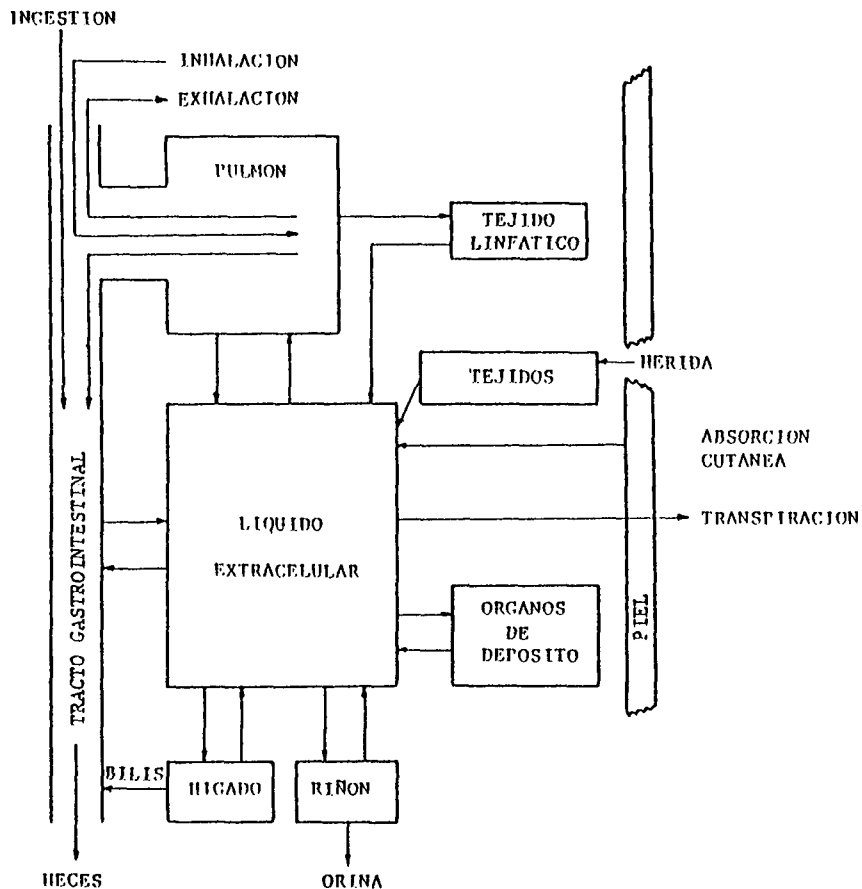
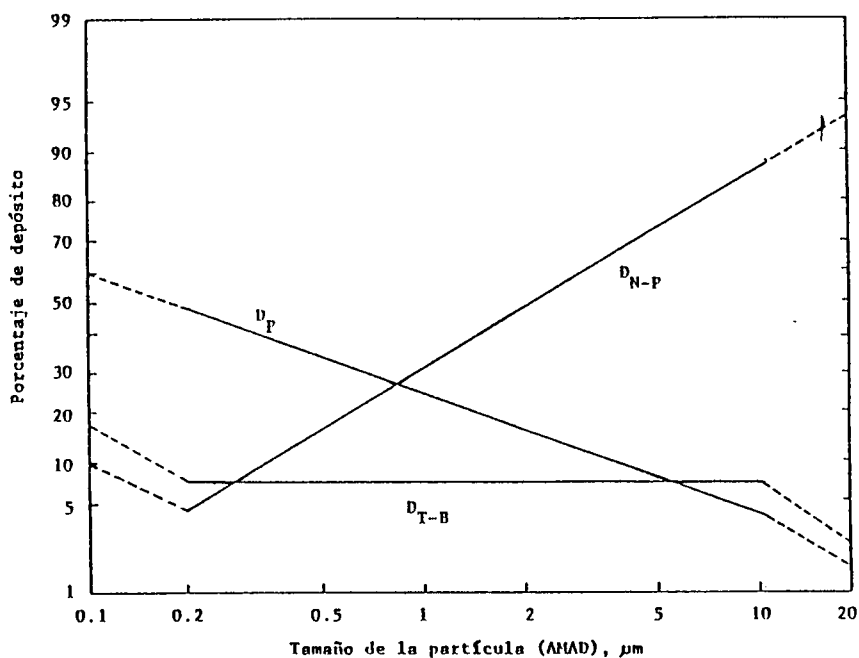


GRAFICO 1

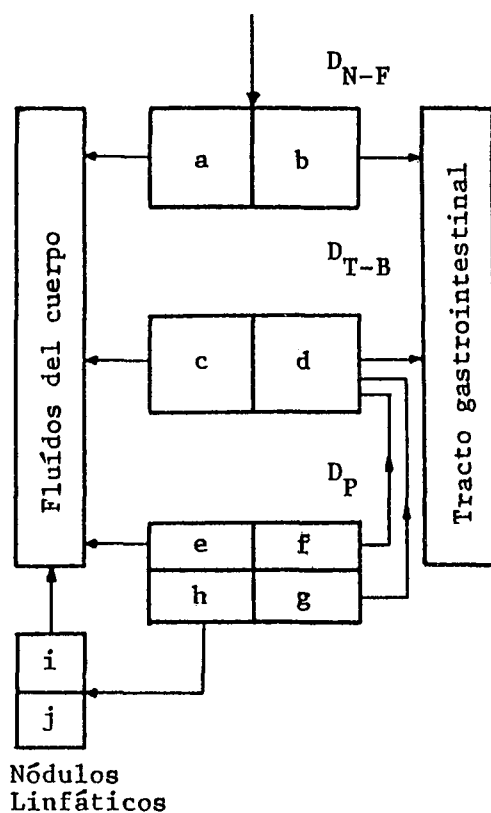
DEPOSITO DE PARTICULAS EN EL SISTEMA RESPIRATORIO EN FUNCION DE
SU TAMAÑO



D_{N-P} = Depósito nasofaríngeo
 D_{T-B} = Depósito traqueobronquial
 D_P = Depósito pulmonar

GRAFICO 2

MODELO MATEMATICO USADO PARA DESCRIBIR LA DEPURACION
DEL SISTEMA RESPIRATORIO PARA AEROSOLES
DE μm DE AMAD



REGION	com par ti men to	CLASE					
		D		W		Y	
		T(días)	f	T(días)	f	T(días)	f
N-F ($D_{N-F}=0.30$)	a	0.01	0.5	0.01	0.1	0.01	0.01
	b	0.01	0.5	0.40	0.9	0.40	0.99
T-B ($D_{T-B}=0.08$)	c	0.01	0.95	0.01	0.5	0.01	0.01
	d	0.2	0.05	0.2	0.5	0.2	0.99
P ($D_P=0.25$)	e	0.5	0.8	50	0.15	500	0.05
	f	n.a.	n.a.	1.0	0.4	1.0	0.4
	g	n.a.	n.a.	50	0.4	500	0.4
	h	0.5	0.2	50	0.05	500	0.15
L	i	0.5	1.0	50	1.0	1000	0.9
	j	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	∞	0.1

N-F= Nasofaríngeo

T-B= Traqueobronquial

B= Pulmonar

L= Sistema Linfático Pulmonar

n.a.= no aplica

D,W,Y= Clases de compuestos

a,b...j= Comportamientos

T= Semiperíodo biológico de depuración

f= Fracción que deja el compartimiento
con un semiperíodo T

GRAFICO 3

MODELO PARA EVALUACIONES DOSIMETRICAS EN EL TRACTO GASTROINTESTINAL

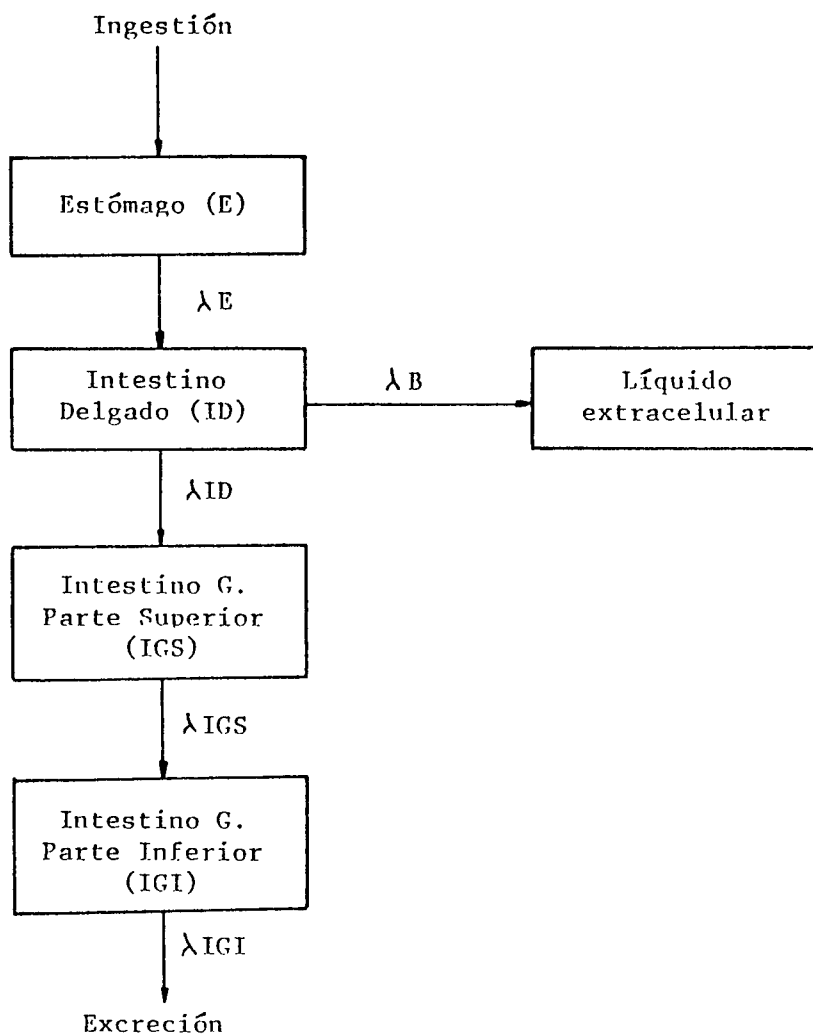


GRAFICO 4