

Nº 26
28.1



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

RADIATIVIDAD NATURAL Y PROCESOS DE
DECAIMIENTO RADIOACTIVO.

TRABAJO ESCRITO

Que para obtener el Título de
QUIMICO FARMACEUTICO BILOGO
p r e s e n t a
MARIA SOL CARRILLO FARGA

México, D. F.

1992

FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
Introducción	1
1. Procesos de decaimiento radiactivo	9
1.1. Ley exponencial del decaimiento radiactivo	9
1.1.1. Vida media y vida promedio	13
1.2. Decaimiento α	14
1.3. Decaimiento β	18
1.3.1. Emisión de negatrones	21
1.3.2. Emisión de positrones	22
1.3.3. Captura electrónica	23
1.4. Decaimiento γ	25
1.4.1. Transición isomérica	27
1.4.2. Conversión interna	28
2. Rayos cósmicos	30
2.1. Irradiación externa	35
2.1.1. Componente ionizante	35
2.1.2. Componente de neutrones	37
2.2. Irradiación interna	41
2.2.1. ^3H	44
2.2.2. ^{14}C	48
2.2.3. ^7Be	51
2.2.4. ^{22}Na	52
3. Fuentes terrestres de radiación	53
3.1. Irradiación externa	54
3.1.1. Exposición al aire libre	56
3.1.2. Exposición dentro de edificios	59
3.2. Irradiación interna	61
3.2.1. ^{40}K	63
3.2.2. ^{87}Rb	65
3.2.3. Serie del ^{238}U	67
3.2.4. Serie del ^{232}Th	77
4. Radón	83
4.1. Concentraciones al aire libre	84
4.2. Concentraciones dentro de edificios	89
4.3. Aspectos biológicos	96
Conclusiones	101
Bibliografía	103

INTRODUCCION

El hombre, al igual que cualquier organismo, siempre ha estado expuesto a las radiaciones ionizantes provenientes de fuentes naturales de radiación (radiación de fondo), que hasta principios de este siglo eran las únicas fuentes de exposición; las variaciones resultaban exclusivamente de migraciones, cambios en los hábitos alimentarios y modificaciones en los materiales con los cuales se hacían las construcciones. De hecho, un asunto que siempre se ha debatido es si la vida evolucionó a pesar de los potenciales efectos nocivos de la radiación o si la capacidad de las radiaciones para inducir mutaciones ha sido un factor determinante en la continua evolución de las especies; pero es muy probable que esta interrogante nunca pueda aclararse.

De todas las fuentes de radiación ionizante, la radiación natural es la que más contribuye a las dosis colectivas que recibe la mayor parte de la población mundial, más aun que todas las fuentes artificiales de radiación.⁹

Conocer los niveles de radiactividad natural y la manera en que varían es el punto de partida lógico para hacer una interpretación inteligente de los datos de los monitoreos, sea en las cercanías de una planta nuclear, en los océanos, en la atmósfera o en los tejidos corporales, para examinar el impacto de las fuentes adicionales de radiación ionizante que resultan de la explotación que el hombre hace del átomo, y para determinar el riesgo potencial de esta exposición, lo mismo que para las demás fuentes de radiación.

Aunque se han realizado numerosos estudios epidemioló-

gicos para tratar de relacionar efectos sobre la salud (incidencia de enfermedades tales como leucemia, cáncer de hueso, etc.) con la exposición a dosis elevadas de radiación natural, estos efectos ocurren tan infrecuentemente, que no ha sido posible obtener datos definitivos.^{3,7}

Por otro lado, los estudios epidemiológicos realizados entre grupos de mineros que trabajan en minas de uranio, expuestos al radón, muestra una clara correlación entre la exposición y un incremento en la frecuencia de cáncer pulmonar, relación que no puede explicarse por otras influencias.⁸ Y puesto que en muchos países se ha demostrado que los niveles de radón tienden a aumentar debido a una combinación del incremento de las concentraciones de radio en los materiales de construcción, técnicas de construcción y disminución de los niveles de ventilación, causa preocupación respecto de las dosis que recibe la población, sobre todo dentro de las viviendas.⁹

El estudio de la radiactividad natural ha demostrado que existe una enorme variabilidad en las dosis recibidas de estas fuentes, algunas de las cuales son tal altas, que ameritan la introducción de medidas correctivas; que varias se alteran por diversas actividades humanas, y que algunas son fácilmente controlables.²⁵

En este trabajo hablaremos de los procesos de decaimiento radiactivo, de las fuentes de radiación natural, y en especial del radón y sus productos de decaimiento, que constituyen la exposición más importante a las fuentes naturales de radiación, y gracias a cuyo estudio recientemente se ha

dado mucho mayor énfasis a la posibilidad de controlar y limitar también las exposiciones a las fuentes naturales.⁹

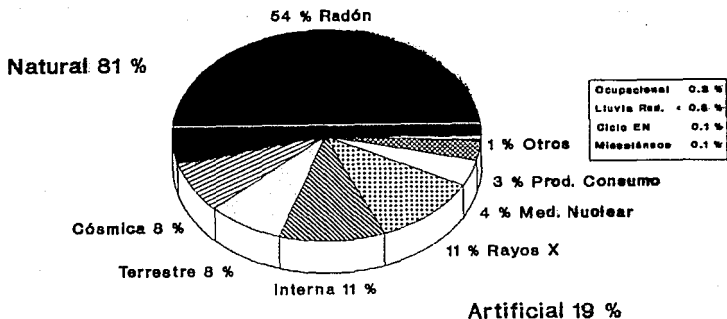


Figura 1. Contribución de las diversas fuentes de radiación a la dosis equivalente efectiva promedio para la población estadounidense. (NCRP No. 93, 1987).

Generalidades

La radiactividad natural procede de fuentes extraterrestres y de elementos radiactivos presentes en la corteza terrestre. Se han encontrado aproximadamente 340 núclidos en la Naturaleza, de los cuales casi un 70% son radiactivos y se encuentran principalmente entre los elementos pesados. Todos los elementos pesados, cuyo número atómico es mayor de 80, poseen isótopos radiactivos naturales, y todos los elementos con número atómico mayor de 83 son radiactivos.

Las fuentes naturales de radiación pueden agruparse en tres tipos de acuerdo con su origen:

1. **Radiación cósmica.** Son radiaciones de alta energía provenientes del Sol y del espacio exterior.
2. **Radionúclidos cosmogénicos.** Se producen por la interacción de los rayos cósmicos primarios con los átomos presentes en la atmósfera.
3. **Radionúclidos primordiales.** Los que han existido en la superficie terrestre a lo largo de su historia; por ejemplo, los núclidos de las series del ^{232}Th , el ^{235}U y el ^{238}U , y algunos otros núclidos. La radiactividad terrestre también considera a los llamados radionúclidos secundarios, productos del decaimiento de los anteriores.

Los radionúclidos naturales pueden dividirse en los que se presentan por separado, tanto de origen cósmico como de origen terrestre, y los que son componentes de las tres cadenas de elementos radiactivos, que son responsables de gran parte de la radiación de fondo a la que están expuestos los seres humanos.

Otra clasificación de las fuentes naturales de radiación es la siguiente:

1. Fuentes externas, que pueden ser de origen extraterrestre (rayos cósmicos) o de origen terrestre, es decir, los radionúclidos presentes en la corteza terrestre, en los materiales de construcción, etc.

2. Fuentes internas, que comprenden los radionúclidos presentes en la Naturaleza que se incorporan al cuerpo humano a través de aire, agua y alimentos (por inhalación o ingestión).

La dosis equivalente efectiva anual promedio debida a fuentes naturales presentada en el último reporte del Comité de las Naciones Unidas para el estudio de las radiaciones atómicas (UNSCEAR, 1988) es de 2.4 mSv para el adulto promedio (tabla 1). La dosis equivalente efectiva se utiliza al hablar de la radiación natural para poder comparar los posibles riesgos de diversas fuentes (tales como el radón).

Para estimar las dosis equivalentes efectivas, el UNSCEAR utilizó los factores de ponderación recomendados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) con respecto a diversos órganos del cuerpo. Según las estimaciones, la dosis equivalente efectiva imputable a fuentes internas es aproximadamente el doble de la atribuible a la irradiación externa. Entre los elementos que contribuyen a la irradiación interna, los productos de desintegración de corto periodo del ^{222}Rn son los más importantes, ya que constituyen, en promedio, el 40% de la dosis equivalente efectiva. Con respecto a la irradiación externa, la dosis equivalente efectiva

debida a los rayos cósmicos es ligeramente inferior a la procedente de la radiación terrestre.¹²

Tabla 1. Dosis equivalente efectiva por persona procedente de fuentes naturales de radiación en áreas de fondo "normal"

Fuente de irradiación	Dosis equivalente efectiva anual (μSv)		
	Irradiación externa	Irradiación interna	Total
Rayos cósmicos			
Comp. ionizante	300		300
Comp. neutrones	55		55
R. cosmogénicos		15	15
R. primordiales			
^{40}K	150	180	330
^{87}Rb		6	6
Serie del ^{238}U			
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{U}$		5	
^{230}Th		7	
^{226}Ra	100	7	1300
$^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{214}\text{Po}$		1100	
$^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Po}$		120	
Serie del ^{232}Th			
^{232}Th		3	
$^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{224}\text{Ra}$	160	13	340
$^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$		160	
Total (redondeado)	800	1600	2400

UNSCEAR, 1988.

Algunas de las contribuciones de la radiación natural a la exposición total son bastante constantes en tiempo y lugar y prácticamente son independientes de las actividades y prácticas humanas. Esto es cierto para las dosis debidas al ^{40}K , que se controla homeostáticamente, y para las dosis por inhalación e ingestión de radionúclidos cosmogénicos, pues éstos se encuentran más o menos uniformemente distribuidos sobre la superficie terrestre. Por otro lado, hay exposiciones que varían enormemente dependiendo de las actividades hu-

manas. Las dosis recibidas dentro de edificios de los productos del decaimiento del ^{220}Rn (thorón) y del ^{222}Rn (radón) son típicos; los diseños y los materiales de construcción, así como los sistemas de ventilación, entre otros factores, alteran los niveles dentro de los edificios. La variabilidad en los niveles entre un edificio y otro también radica en la cantidad que entra proveniente del suelo, lo cual es bastante difícil de predecir. Entre estos dos tipos extremos de exposición se encuentran varios otros:

a) Dosis externas provenientes de los rayos cósmicos, que, aunque influenciados por las prácticas humanas, son bastante predecibles, pero que no pueden controlarse excepto al mudarse hacia una zona de niveles más bajos.

b) Dosis provocadas por la inhalación e ingestión de núclidos de periodo largo de las series ^{232}Th y ^{238}U , que representan una pequeña contribución a la dosis total causada por las fuentes naturales y que son relativamente constantes en el espacio.

c) Dosis externas de fuentes terrestres, que también son significativamente alteradas por las prácticas humanas, en especial en lo que se refiere a la exposición dentro de edificios. Tales dosis son, sin embargo y como regla, menores que las resultantes de la inhalación de los productos del decaimiento del radón y mucho menos controlables.

La dosis equivalente efectiva anual por persona para la población mundial es de aproximadamente 3 mSv, con un rango de 1.5 a 6.0 mSv; la mayor parte de ésta (2.4 mSv) proviene de la radiación de fondo, y entre 0.4 y 1 mSv, de exposicio-

nes médicas. Otras fuentes contribuyen con menos de 0.02 mSv anualmente. Las exposiciones resultantes de las actividades industriales que traen a la superficie terrestre o hacen asequibles para el público, materiales con concentraciones incrementadas de radionúclidos que existen en forma natural, no alteran de manera significativa los datos presentados en la tabla 1 y además son, en su mayoría, controlables.²⁵

Cabe mencionar que las estimaciones de las exposiciones se basan esencialmente en mediciones realizadas en latitudes templadas y en las costumbres alimentarias y de vida de los habitantes de estas regiones. Se reconoce que la exposición de las poblaciones en latitudes tropicales puede variar sustancialmente, debido a diferencias en las concentraciones ambientales y en los hábitos propios de estas personas, y que estos valores sólo son aplicables a adultos que viven en zonas de radiación de fondo "normal".²⁰

CAPITULO 1. PROCESOS DE DECAIMIENTO RADIOACTIVO

1.1. Ley exponencial del decaimiento radiactivo

Cualquier núcleo que cambia su estructura emitiendo rayos γ o alguna partícula nuclear (α , β^+ , β^-) se denomina núcleo radiactivo. Hasta ahora se conocen aproximadamente 1900 núclidos, pero sólo 279 son estables. Para éstos, en la figura 2 se muestra una gráfica Z vs N para el rango $0 < Z < 100$. Si la relación Z:N para un núcleo dado difiere de la reflejada en esta gráfica, se vuelve inestable y sufre algún tipo de decaimiento radiactivo para alcanzar estados de menor energía y, por lo tanto, más estabilidad. En este proceso, la masa total de los productos es menor que la masa del átomo que decae; entonces, los productos de decaimiento pueden alcanzar un nivel de energía que es menor en grado equivalente al defecto de masa.²⁶

Nótese que para $Z < 20$, la línea de estabilidad es una recta con $Z = N$. Para los núclidos más pesados, $Z > 20$ y $N > 20$, la curva de estabilidad se inclina en la dirección $N > Z$. Evidentemente, para mayores valores de Z, la repulsión electrostática de Coulomb se vuelve considerable y el número de neutrones tiene que ser mayor para compensar este efecto.

Mediante el uso de campos magnéticos, se demostró que hay tipos distintos de radiación, a saber, α , β y γ . Los dos primeros pueden ser desviados en un campo magnético (lo cual indica que se trata de partículas cargadas), no así la radiación γ , ya que es una forma de radiación electromagnética similar a la luz (como los rayos X en carácter, pero no en energía). Durante mucho tiempo no se hizo distinción en-

tre los rayos γ nucleares y los rayos X extranucleares que con frecuencia acompañan a las transformaciones radiactivas.

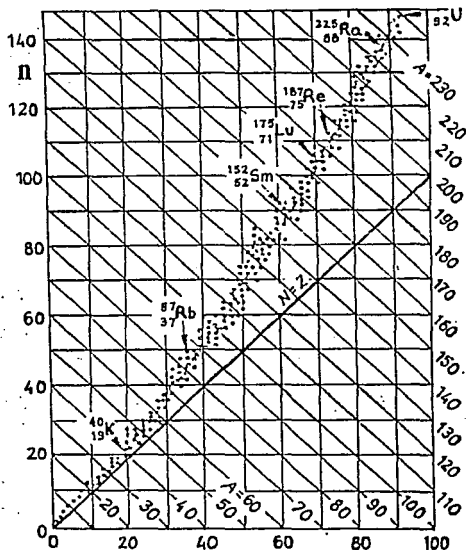


Figura 2. Correlación entre el número de protones (Z) y el de neutrones (N) en los núclidos naturales. (Vertes y Kiss, 1987).

Tres aspectos caracterizan el decaimiento radiactivo de un elemento dado, a saber:

1. Vida media de la emisión
2. Energía de la emisión
3. Tipo de emisión

En el decaimiento radiactivo - así como en otras reac-

ciones nucleares- deben satisfacerse ciertas leyes de conservación: la energía total, el momentum lineal, la carga total, el número de masa y el momentum angular del sistema deben permanecer constantes. Las tres primeras leyes son generales en física; las dos últimas se refieren en particular a las reacciones nucleares.²

En un sistema dado, la concentración de núclidos radiactivos disminuye gradualmente, mientras que la de los productos de decaimiento siempre se incrementa. Si el producto de decaimiento también es radiactivo, la razón de sus actividades puede algunas veces alcanzar un equilibrio.

La probabilidad de que los núcleos radiactivos decaigan se manifiesta en la ley del decaimiento. Esta ley tiene un carácter estocástico, es decir, sólo se cumple para muchos átomos radiactivos. La probabilidad de decaimiento es un valor característico de los átomos en cuestión.

Cuando se trata de un gran número de átomos, se encuentra que todas las sustancias radiactivas siguen el mismo patrón general de decaimiento. Por ejemplo, si se tiene una fuente radiactiva y alguna manera de contar los átomos que se desintegran en un intervalo dado de tiempo, al graficar el número de átomos presentes contra el tiempo en papel semilogarítmico, se obtiene una línea recta. Esto indica que el decaimiento radiactivo es un proceso exponencial, es decir, que la misma fracción de átomos presentes decaen durante un lapso de tiempo.

Si N representa el número de átomos presentes en un momento dado y dN , el número de desintegraciones durante el in-

tervalo de tiempo dt , entonces:

$$\text{Probabilidad de desintegración} = - dN / N \quad 1$$

en donde el signo negativo indica que dN siempre es negativo.

La probabilidad de desintegración por unidad de tiempo, λ , es entonces:

$$\lambda = \frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = \text{constante} \quad 2$$

donde λ es la llamada constante de desintegración, y expresa la probabilidad de que un átomo decaiga en una unidad de tiempo. Mientras más alto es el valor de λ , más rápido decae el radioelemento.

Para la gran mayoría de las sustancias radiactivas, ningún intento de alterar λ por variación en las condiciones ordinarias como temperatura, cambio químico, presión y campos eléctricos, magnéticos y gravitacionales ha producido efectos detectables. Esto permite caracterizar a los núcleos radiactivos por su periodo de decaimiento, sin importar su condición física o química.

En el trabajo práctico con materiales radiactivos, el número de átomos no se evalúa directamente y el índice de cambio dN/dt tampoco se mide absolutamente. El procedimiento común es determinar una cantidad proporcional a λN , denominada actividad, (A), que se define como:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N \text{ desintegraciones/seg}$$

y representa la velocidad a la que ocurren las desintegraciones.

La unidad de la actividad de acuerdo al Sistema Internacional es el Becquerel (Bq), que equivale a 1 dps, aunque todavía se utiliza comúnmente el Curie (Ci), el cual representa 3.7×10^{10} desintegraciones /seg.

La ecuación 2 puede escribirse de una manera un poco diferente; si hay N_0 átomos al $t=0$, entonces:

$$N_0 \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_{t_0}^t -\lambda dt \quad \text{o} \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

que en forma exponencial es:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad 3$$

Cuando la ecuación anterior se multiplica por :

$$\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

Donde $\lambda N_0 = A_0$ es la actividad inicial y

$\lambda N = A$ es la actividad a un tiempo t

Entonces la actividad es:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad 4$$

o, expresado en forma logarítmica:

$$\ln A = \ln A_0 - \lambda t$$

1.1.1. Vida media y vida promedio

La vida media, $T_{\frac{1}{2}}$, de un radioisótopo se define como el tiempo que transcurre para que el número de átomos decaiga

a la mitad del número inicial, o el tiempo en el cual la actividad disminuye a la mitad de su valor inicial.

Cuando $t = T_{1/2}$, entonces el número de átomos presentes es $N = \frac{1}{2} N_0$, y de la ecuación 3 :

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

Tomando el logaritmo natural en ambos lados de la ecuación:

$$-\ln 2 = -\lambda T_{1/2}$$

Entonces, la vida media se define como:

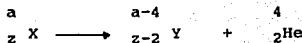
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

Cuando $t = T_{1/2}$, hay el mismo número de padre y de hijo.

1.2. Decaimiento α

El decaimiento α es un proceso en el cual el núcleo padre se desintegra en un núcleo hijo y una partícula α .

La partícula α es un núcleo de helio doblemente ionizado He^{++} , que se mueve a alta velocidad. En el proceso de decaimiento α espontáneo, el núcleo padre pierde dos protones y dos neutrones, disminuyendo su masa en cuatro unidades y su carga en dos unidades. La desintegración nuclear puede representarse de la manera siguiente:



Las partículas α se forman en el núcleo justo antes de ser emitidas.²⁶

Los emisores α se encuentran entre los núclidos pesados con altos números atómicos ($Z > 79$), donde la relación N/Z es menor que la requerida en la figura 2 y puede alcanzarse una relación más favorable (más alta) de N/Z a través del decaimiento α . Aunque también algunos núclidos que decaen por emisión α tienen Z menor a 79.

En un principio se pensó que cada especie α emisora sólo tenía una energía de partícula α asociada a ella. No fue sino hasta 1929 en que se descubrió la radiación del ^{212}Bi , que consiste de partículas de diferentes energías. Experimentos posteriores han demostrado que incluso en esos casos, las energías α siempre son discretas, y que el exceso de energía remanente en el núcleo se emite en forma de un fotón.²⁶

En la figura 3 se muestra el diagrama de decaimiento del ^{226}Ra a ^{222}Rn , en el que las dos flechas hacia abajo y hacia la izquierda señalan los dos modos de decaimiento α , además de la energía de las partículas α y las frecuencias. Cuando se emite la partícula de menor energía, el núcleo de radón queda en un estado excitado, con una energía aproximada de 0.186 MeV más alta que el estado basal. Entonces, casi inmediatamente, se emite un rayo γ de esta energía (mostrado por la línea ondulada). La frecuencia de 4% asociada a esta emisión del fotón implica que en el 1% restante del número

total de desintegraciones se emite un electrón de conversión interna.

Las energías α varían entre 1.8 MeV (^{144}Nd) y 11.4 MeV (^{212}Po), pero la gran mayoría se encuentra entre 4 y 8 MeV.⁴

El valor de λ depende en mucho de E_α y de R (radio nuclear); por ejemplo, un aumento en el valor de E de 3 a 10 MeV incrementa la constante de decaimiento en un factor de hasta 10^{26} . Por eso las vidas medias de las especies α emisoras cubren un tan amplio rango de tiempo: de fracciones de segundo a varios miles de millones de años.

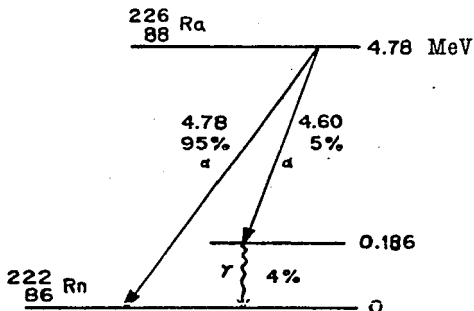


Figura 3. Esquema del decaimiento nuclear del ^{226}Ra . (Turner, 1986).

88

Puesto que el valor de R y de Z muestra solamente una pequeña variación en las familias individuales de los emisores α naturales (series del torio, actinio y uranio), el valor de λ depende en su mayor parte de E_α . Este hecho permite explicar la llamada ley de Geiger-Nuttall, que establece

una relación cuantitativa entre la constante de decaimiento y el rango de las partículas α en el aire (R_α), que es función de E_α :

$$\log \lambda = a + b \log R_\alpha$$

donde b es una constante, y a tiene un valor diferente para cada una de las series.²⁶

Al pasar a través de la materia, las partículas α pierden energía principalmente por colisiones inelásticas con electrones que encuentran a su paso, dando lugar a excitación y ionización de los átomos y moléculas a los cuales pertenecen estos electrones. La enorme diferencia entre la masa de las partículas α y los electrones implica que la partícula α sólo pierde una pequeña fracción de su energía y que virtualmente no es desviada como resultado de la colisión. Entonces, las partículas α son detenidas gradualmente debido a un gran número de pequeñas pérdidas de energía y viajan en una trayectoria casi recta.²¹

La energía que una partícula α pierde al pasar a través de la materia se expresa generalmente en términos de la transferencia lineal de energía (LET) que se define como la razón lineal de pérdida de energía (absorbida localmente) por una partícula ionizante al atravesar un material. El LET depende de la energía de la partícula α .²¹

Las partículas α son las radiaciones menos penetrantes de los isótopos radiactivos, pero tienen los valores más altos de LET.

Relación rango-energía

Para cálculos aproximados, la energía de una partícula α con rango (alcance o longitud de trayectoria) entre 3 y 7 cm puede calcularse con la siguiente ecuación empírica:

$$\bar{R} = 0.318 E^{3/2}$$

en donde:

E es la energía en MeV

\bar{R} es el rango promedio (cm) en aire a 15 °C y 760 mm de Hg

Las partículas α más energéticas se encuentran entre los radionúclidos de vidas medias más cortas.

Las partículas α tienen rangos muy cortos y no pueden penetrar ni siquiera la capa más externa de piel. Por eso no constituyen un peligro externo para el cuerpo. Sin embargo, si penetra por inhalación, ingestión o a través de una herida, una fuente α puede representar un peligro como emisor interno, además de los rayos γ que pudiesen venir acompañando a estas fuentes.²²

1.3. Decaimiento β

Algunos de los núcleos inestables con una relación N/Z desfavorable, pueden alcanzar un estado más estable mediante decaimiento β . De esta manera, los núcleos radiactivos pueden deshacerse del exceso de neutrones (emisión de negatrones), así como del de protones (emisión de positrones).

Los procesos de decaimiento radiactivo que se designan en general como decaimiento β incluyen:

1. El núcleo decae por emisión de electrón, o emisión de negatrón, denotado por β^- .
2. El núcleo decae por emisión de positrón, denotado por β^+ .
3. Captura de un electrón orbital por el núcleo, denominada captura electrónica.²

Estos tres tipos de desintegración también se conocen como transformaciones isobáricas porque no involucran un cambio en el número de masa, pero siempre hay un cambio en la carga nuclear.

Las partículas β son electrones rápidos emitidos por núcleos radiactivos. A diferencia de las partículas α , las partículas β de un elemento radiactivo no se emiten en grupos discretos de energía, sino en una distribución continua de energía que varía de cero hasta un valor máximo ($E_{\beta\text{máx}}$) que es característico del elemento.²¹

Durante mucho tiempo uno de los grandes enigmas de la física nuclear fue que las energías de la mayoría de las partículas β eran menores que $E_{\beta\text{máx}}$. Al parecer, en este proceso se violaba la ley de la conservación del momentum angular. Este problema llevó a Pauli a asumir que el decaimiento β incluye la emisión de otra partícula, el neutrino (ν). El neutrino tiene un valor de spin de $1/2$ (para permitir la conservación del momentum angular), una carga eléctrica de cero y una masa de casi cero.^{2, 21, 26}

La teoría del decaimiento β ha demostrado que se emiten antineutrinos ($\bar{\nu}$) en el decaimiento de negatrones, y neutrinos (ν) en el de positrones.

La teoría del neutrino también explica el espectro de

energía en el decaimiento β . En términos generales, la energía liberada en el decaimiento β está distribuida entre el electrón y el neutrino.²

La energía máxima de las partículas ($E_{\beta\text{máx}}$) determina el máximo rango que la radiación tiene en la materia, pero sólo una pequeña fracción de las partículas tiene energías cercanas a $E_{\beta\text{máx}}$.

Al atravesar la materia, las partículas β pierden energía predominantemente por colisiones inelásticas con electrones, de manera similar a las partículas α . Sin embargo, puesto que la partícula β y el electrón contra el cual choca tienen la misma masa, la partícula puede perder hasta la mitad de su energía en una sola colisión y ser muy desviada. Las partículas también se desvían al pasar cerca de un núcleo atómico. Como consecuencia, incluso las partículas β que inician con la misma energía, pueden detenerse en puntos muy separados, y no tienen un rango fijo en la materia, aunque sí muestran una distancia máxima de penetración, o rango máximo.

Para las partículas pesadas, tales como las α , que recorren caminos casi rectos, el rango (la penetración de la radiación a través del material absorbedor) y la longitud de la trayectoria son lo mismo. Pero como las partículas β sufren desviaciones de su camino en línea recta, la longitud de la trayectoria es bastante mayor que la distancia que penetran.²¹

Los electrones (y los positrones) no pueden existir en el núcleo. Se supone que el negatrón (o el positrón) se crean

en el momento en que el núcleo decae, mientras que en el proceso de captura electrónica el electrón desaparece y su masa se convierte en energía.

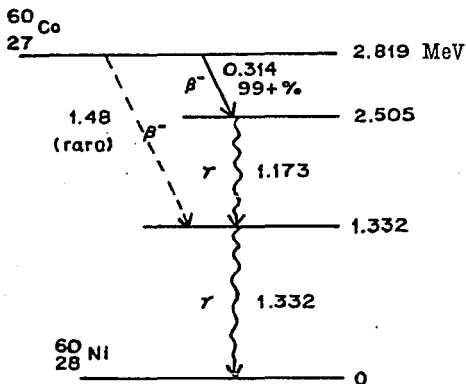
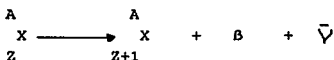


Figura 4. Esquema de decaimiento del $^{60}_{27}\text{Co}$. (Turner, 1986).

1.3.1. Emisión de neutrones

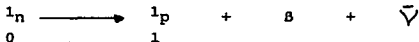
El proceso puede escribirse simbólicamente de la manera siguiente:



Sin embargo, si tomamos en cuenta los electrones, el átomo padre tiene Z electrones orbitales, mientras que el

átomo hijo, con una carga nuclear de $Z + 1$, debe capturar un electrón de los alrededores para volverse neutro.

En este caso, el núcleo hijo tiene $Z+1$ protones, o un protón más que el padre y un neutrón menos; esto implica un decaimiento del neutrón de acuerdo al siguiente esquema:



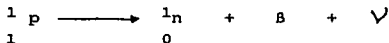
1.3.2. Emisión de positrones

El decaimiento de positrones o $\beta+$ puede escribirse simbólicamente de la siguiente manera:



Aquí, si consideramos las cargas atómicas netas, el núcleo hijo tiene un número atómico menor en una unidad que el padre.

El decaimiento de positrones puede interpretarse como la transformación de un protón en un neutrón, acompañada de la emisión de un positrón y de un neutrino.



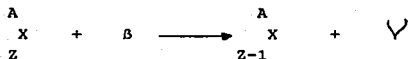
1.3.3. Captura electrónica

La captura electrónica, en la cual se reduce Z en una unidad sin cambiar A , es un proceso alternativo al decaimiento β positivo. La diferencia es que en este caso el núcleo captura uno de los electrones atómicos, unido con una energía E^B MeV y se emite un neutrino de energía E^0 MeV, donde E^0 es la diferencia entre las masas atómicas de padre e hijo. Los dos procesos pueden tener lugar simultáneamente²¹ y son competitivos. La captura electrónica no se descubrió sino hasta 1938 porque no se acompaña de radiación nuclear detectable, excepto cuando el producto queda en estado excitado y se emiten rayos γ .⁴

En el proceso de captura electrónica (y, de hecho, en todos los procesos de decaimiento β) se emite un espectro continuo de radiación electromagnética de muy baja intensidad, llamado *bremstrahlung* interno, que es difícil de detectar cuando se emiten rayos γ nucleares debido a su baja intensidad.⁴ La captura electrónica es el modo de decaimiento predominante de los núcleos deficientes en neutrones, cuyo número atómico es mayor de 80.²

Dado que los electrones que mayor probabilidad tienen de ser capturados son los que se encuentran más cerca del núcleo, (los electrones de la capa K) la captura de electrones se denomina con frecuencia captura K.

Los electrones remanentes se reorganizan ellos mismos para corresponder a la nueva estructura del átomo, y se emiten rayos X característicos del nuevo sistema atómico durante este proceso. El esquema es el siguiente:



Dado que el número de protones en el núcleo hijo es uno menos que en el padre y el número de neutrones es uno más, la captura K puede interpretarse como:



Si el vacío de la capa K es llenada por un electrón de la capa L, la diferencia entre las energías de enlace de K y L puede emitirse como rayos X característicos o puede utilizarse en un proceso fotoeléctrico interno en el que se emite un electrón extranuclear adicional de las capas L, M u otra, con una energía cinética igual a la energía característica de los rayos X menos su propia energía de enlace. Estos son los llamados **electrones Auger**.⁴

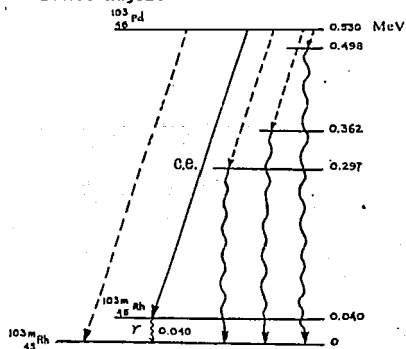
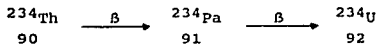
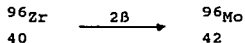


Figura 5. Esquema del decaimiento del ^{103}Pd . (Turner, 1986).

Algunos núclidos naturales y productos de fisión que tienen un enorme exceso de neutrones o protones llevan a cabo decaimientos β en secuencia.



También puede suceder que dos decaimientos β tengan lugar en sucesión muy rápida, y se cree que en algunos casos dos partículas β se emiten de manera simultánea (decaimiento β doble).



Algunos emisores β no tienen rayos γ acompañantes. Entre estos emisores β puros están: ${}^3\text{H}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{32}\text{P}$ y ${}^{90}\text{Sr}$.

Los rayos β pueden tener la suficiente energía como para penetrar la piel y ser así un peligro externo de radiación. Los emisores β internos también constituyen un peligro. Las partículas de alta energía (en el rango de MeV) pueden emitir además bremsstrahlung.²²

1.4. Radiación γ

Los rayos γ son radiación electromagnética de origen nuclear con longitudes de onda corta (en la región de 3×10^{-9} cm a 3×10^{-11} cm). La relación entre longitud de onda y

$$E = hc/\lambda$$

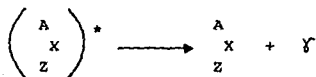
donde h = constante de Planck

c = velocidad de la luz

λ = longitud de onda

En el decaimiento de los núcleos por emisión de una partícula, sea α o β , generalmente el núcleo queda excitado. El núcleo efectúa la transición a un estado de menor energía y libera el exceso de energía por emisión de rayos γ o por el proceso llamado conversión interna.

El decaimiento γ se representa esquemáticamente de la siguiente manera:



Donde el asterisco indica un núcleo excitado, y tanto el padre como el hijo tienen la misma estructura de partículas nucleares. Las transiciones que resultan en la emisión γ dejan sin cambio A y Z y se llaman isoméricas.

Si E^* es la energía asociada al estado excitado y E es la energía del estado basal, entonces los rayos γ tienen una energía:

$$h\nu = E^* - E$$

donde ν es la frecuencia de los rayos γ emitidos.

La absorción de los rayos γ es diferente a la de las partículas cargadas. Las partículas α o β pierden su energía por colisiones inelásticas y se "desaceleran" hasta que

finalmente se detienen. Con los rayos γ no sucede lo mismo, pero a medida que atraviesan la materia su intensidad se reduce de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

donde: μ es el coeficiente de absorción lineal del material absorbedor, que es función de la energía de la radiación y de la densidad del material (dado en cm^{-1})
y x el espesor en cm del material absorbedor

El LET no es aplicable a la radiación γ en sí misma, pero existen valores de LET para los electrones secundarios producidos por la absorción de la radiación γ en el agua.²¹

1.4.1. Transición isomérica

En la mayoría de los casos, la emisión de rayos γ ocurre inmediatamente después del decaimiento α o β (en menos de 10^{-12} seg), pero en algunos casos el núcleo puede permanecer en estados elevados de energía durante más tiempo; a estos núcleos excitados se les llama isómeros.

Un ejemplo de ello es el $^{60\text{m}}\text{Co}$, que decae con una vida media de 10.5 minutos al estado base de ^{60}Co . El decaimiento en este caso se llama transición isomérica.² Otro ejemplo es el del $^{99\text{m}}\text{Mo}$, que decae por emisión β a un estado excitado de tecnecio, que tiene una vida media promedio de 8.7 horas antes de emitir un fotón. Estas especies nucleares se deno-

minan metaestables.

La existencia de una transición isomérica (o transición retardada) da como resultado un par de núcleos que tienen el mismo número de masa y número atómico, pero uno tiene más energía que el otro, y por lo tanto, diferentes propiedades radiactivas.

La definición de un isómero nuclear en términos de la "vida media medible" es un poco vago, pues el desarrollo de nuevas técnicas continúa ampliando el límite inferior de lo que es medible. En el límite superior de la escala probablemente tampoco existe fin; el $^{210\text{m}}\text{Bi}$ tiene una vida media de 3.5×10^6 años.⁴

1.4.2. Conversión interna

En el caso de que en vez de emitirse un fotón γ se emita un electrón, al fenómeno se le conoce como conversión interna. La emisión del electrón es seguida de un rearrreglo en las capas electrónicas, que, a su vez, se acompaña de emisión de rayos X característica del elemento.²⁶

El llamado coeficiente de conversión interna (α) se define como la relación entre la probabilidad de emisión de electrones (p_e) y la de emisión γ (p_γ)²⁶ y su valor puede variar entre 0 e ∞ :⁴

$$\alpha = p_e / p_\gamma$$

En la conversión interna no se emiten rayos γ ; es un

modo alternativo a la emisión de rayos γ para desexcitar al núcleo.

El electrón expulsado, llamado electrón de conversión, normalmente proviene de un orbital interno.²

La conversión interna es común en núcleos pesados, especialmente en el decaimiento de estados de baja E^* , mientras que el decaimiento γ es más frecuente en los núcleos ligeros.

CAPITULO 2. RAYOS COSMICOS

La radiación de alta energía que llega a la atmósfera terrestre del espacio exterior se conoce como rayos cósmicos primarios. Por su interacción con los núcleos de los átomos presentes en el aire se producen los llamados rayos cósmicos secundarios y una variedad de productos de reacción (núclidos cosmogénicos) tales como: ^3H , ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C , ^{22}Na y ^{24}Na . Los rayos cósmicos secundarios de alta energía formados de esta manera reaccionan posteriormente con núcleos presentes en el aire para formar más partículas secundarias.²⁵

Los rayos cósmicos consisten de 87% de protones, 11% de partículas α , aproximadamente 1% de núcleos cuyo número atómico, Z , se encuentra entre 4 y 26, y 1% de electrones de muy alta energía.³

Una característica sobresaliente de la radiación cósmica es que es altamente penetrante y su energía promedio es de 10^{10} eV, aunque sus máximas energías llegan a ser hasta de 10^{19} eV. Las radiaciones primarias predominan en la estratósfera a más de 25 km de altitud.³

Actualmente se sabe que estas radiaciones se originan fuera de nuestro sistema solar y que sólo una pequeña fracción es de origen solar; sin embargo, esta parte adquiere importancia fuera de la atmósfera posteriormente a erupciones solares asociadas a la actividad de las manchas solares, que siguen un ciclo de 11 años.³

Basados en estudios realizados con meteoritos, se sabe que la tasa de fluencia de los rayos cósmicos ha permanecido constante por lo menos durante 2000 años, y que no ha variado

en más de un factor de dos en los últimos 10^9 años.¹⁰

El componente primario de la radiación cósmica puede dividirse a su vez en radiación galáctica y radiación solar.

Rayos cósmicos galácticos primarios

Los rayos cósmicos galácticos primarios consisten fundamentalmente de protones de alta energía que penetran al sistema solar procedentes del espacio interestelar, acompañados de iones de ${}^4\text{He}$ en una proporción aproximada del 10%, y de proporciones mucho menores de partículas más pesadas, así como de electrones, fotones y neutrinos. Aproximadamente una partícula de cada 2000 tiene una masa 20 veces mayor que el hidrógeno; entre estas partículas pesadas, los núcleos de hierro son bastante abundantes.⁶

La densidad del flujo primario es afectada por el campo magnético terrestre, que desvía de vuelta al espacio las partículas cargadas de bajas energías. Este efecto depende de la latitud geomagnética, de manera que la densidad del flujo de los protones de baja energía en las capas superiores de la atmósfera es mayor en los polos que en las regiones ecuatoriales.²⁴

A medida que una partícula cargada se aproxima a la Tierra, queda influida por el campo magnético de ésta. Para poder atravesar la Tierra, la partícula debe tener cierto momento; de otra manera, queda atrapada en el campo magnético de la Tierra. Esto da origen a dos cinturones de radiación (de Van Allen) que se observan a grandes altitudes y son si-

métricos respecto del ecuador magnético. Debido a las diferencias en la proporción entre carga y masa de los protones y los electrones, divergen sus trayectorias, así que se forma un cinturón interno que consiste principalmente de protones y uno externo, de electrones.³

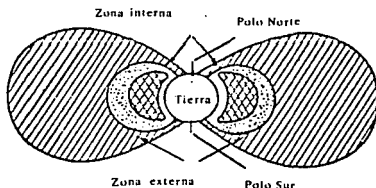


Figura 6. Las radiaciones atrapadas por el campo geomagnético de la Tierra. (Eisenbud, 1987).

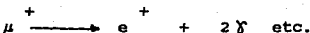
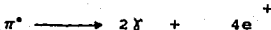
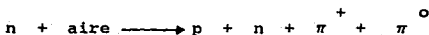
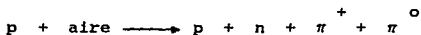
La tasa de fluencia de los protones galácticos de baja energía en las capas superiores de la atmósfera varía con el tiempo, conforme al ciclo solar de 11 años; este fenómeno se conoce como modulación. La tasa de fluencia es mínima durante las épocas de máxima actividad solar y pasa por un máximo durante el periodo de baja actividad solar.²⁴

Además de esta modulación, ocurren decrementos repentinos (decrementos Forbush) en la intensidad de los rayos cósmicos, que son provocados por alteraciones magnéticas entre el Sol y la Tierra.¹⁹

El efecto Forbush, el campo geomagnético y el viento

solar alteran la composición de los rayos cósmicos de manera relativamente simple: removiendo núcleos de bajo momentum. La interacción con la atmósfera es mucho más compleja y resulta en la producción de partículas secundarias, y en una atenuación profunda del flujo primario.¹⁹

Las cinco principales reacciones que se verifican cuando los rayos cósmicos interactúan con el aire son las siguientes:



Las dos primeras ecuaciones ilustran la producción de mesones a partir de la interacción de neutrones y protones con la atmósfera. La tercera ecuación muestra la producción de muones, y la cuarta, el decaimiento de piones. En la última ecuación se muestra el decaimiento de muones y una cascada electromagnética.¹⁰

Rayos cósmicos solares

El sol genera un flujo constante de partículas cargadas de muy bajas energías, el viento solar, que no penetra sufi-

cientemente el campo magnético de la Tierra. Pero ocasionalmente se verifican grandes erupciones solares durante las que se liberan gran número de partículas cargadas, sobre todo protones y partículas α . Como estas partículas tienen energías relativamente bajas, no suelen causar aumentos importantes en las dosis de radiación en la superficie terrestre.²⁴

Tabla 2. Composición de los rayos cósmicos ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$) a 54°N cerca del máximo solar, en términos de la densidad de flujo vs profundidad atmosférica.

P. Atm. (g/cm^2)	Altitud (km)	Muones	Electrones	Protones	Piones	Neutrones
20	26.7	2.11×10^{-2}	4.33	7.12×10^{-1}	1.74×10^{-3}	8.02
50	20.8	6.64×10^{-2}	5.07	6.30×10^{-1}	4.78×10^{-3}	1.09×10
100	16.3	1.01×10^{-1}	3.94	4.56×10^{-1}	6.88×10^{-3}	1.06×10
150	13.7	1.13×10^{-1}	2.74	3.21×10^{-1}	6.92×10^{-3}	7.91
200	11.9	1.11×10^{-1}	1.82	2.21×10^{-1}	5.93×10^{-3}	5.86
250	10.5	1.03×10^{-1}	1.19	1.49×10^{-1}	4.70×10^{-3}	4.19
300	9.31	9.34×10^{-2}	7.71×10^{-1}	1.00×10^{-1}	3.60×10^{-3}	2.94
350	8.26	8.33×10^{-2}	4.00×10^{-1}	6.67×10^{-2}	2.68×10^{-3}	2.04
400	7.33	7.16×10^{-2}	3.19×10^{-1}	4.40×10^{-2}	1.89×10^{-3}	1.38
450	6.5	6.31×10^{-2}	2.08×10^{-1}	2.90×10^{-2}	1.34×10^{-3}	9.33×10^{-1}
500	5.73	5.56×10^{-2}	1.36×10^{-1}	1.90×10^{-2}	9.46×10^{-4}	6.27×10^{-1}
550	5.02	4.92×10^{-2}	9.04×10^{-1}	1.24×10^{-2}	6.57×10^{-4}	4.18×10^{-1}
600	4.35	4.31×10^{-2}	5.89×10^{-2}	8.10×10^{-3}	4.46×10^{-4}	2.75×10^{-1}
650	3.75	3.84×10^{-2}	4.00×10^{-2}	6.23×10^{-3}	3.04×10^{-4}	1.81×10^{-1}
700	3.17	3.44×10^{-2}	2.77×10^{-2}	3.35×10^{-3}	2.05×10^{-4}	1.19×10^{-1}
750	2.62	3.10×10^{-2}	1.95×10^{-2}	2.13×10^{-3}	1.38×10^{-4}	7.72×10^{-2}
800	2.1	2.81×10^{-2}	1.41×10^{-2}	1.36×10^{-3}	9.22×10^{-5}	5.02×10^{-2}
850	1.62	2.56×10^{-2}	1.05×10^{-2}	8.67×10^{-4}	6.14×10^{-5}	3.25×10^{-2}
900	1.15	2.34×10^{-2}	8.07×10^{-3}	5.55×10^{-4}	4.07×10^{-5}	2.10×10^{-2}
950	0.71	2.15×10^{-2}	6.36×10^{-3}	3.56×10^{-4}	2.69×10^{-5}	1.35×10^{-2}
1033	0.0	2.90×10^{-2}	4.55×10^{-3}	1.71×10^{-4}	1.34×10^{-5}	6.46×10^{-3}

NCRP No. 45, 1987.

2.1. Irradiación externa

La irradiación externa proviene de dos fuentes de aproximadamente la misma magnitud: la radiación cósmica y la radiación γ terrestre de los radionúclidos presentes en el medio ambiente. El campo de radiación externa consiste de penetrantes radiaciones y puede considerarse, como una primera aproximación, que irradian uniformemente el cuerpo.¹⁴

En el caso de la radiación cósmica, cuando las partículas primarias penetran en la atmósfera, las que tienen mayores energías intervienen en reacciones nucleares (reacciones de estallamiento) con núcleos de los átomos presentes en el aire, produciendo protones, neutrones, piones y kaones, así como radiación electromagnética (rayos cósmicos secundarios) y una gran variedad de productos de reacción (núclidos cosmogénicos) como ^3H , ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C y ^{22}Na . Los protones, neutrones y piones de alta energía formados de esta manera, reaccionan a su vez con núcleos de aire para formar más partículas secundarias. La mayor parte de estos secundarios son muones y electrones (componente ionizante) y un número menor de neutrones. Este proceso recibe el nombre de cascada, y de esta manera resultan hasta 10^8 secundarios a partir de un solo primario.

2.1.1. Componente ionizante

La tasa de producción de iones por unidad de volumen en el aire libre es una medida de la tasa de fluencia del componente total de partículas cargadas del campo de rayos cósmi-

cos, y suele expresarse en número de iones formados por segundo en cada cm^3 de aire a presión y temperatura normales. Los valores reportados de la tasa de densificación iónica de los rayos cósmicos a nivel del mar y medidos en distintos lugares muestran una concordancia bastante buena, alrededor de $2.1/\text{cm}^3 \text{ s}$, valor que se utiliza para calcular la tasa del índice de dosis absorbida.²⁴

En la atmósfera baja, la razón de dosis en el aire debida al componente ionizante varía poco con la latitud, pero significativamente con la altitud, duplicándose aproximadamente cada 1500 metros (fig. 7). Sin embargo, para los primeros 1000 metros, la razón de dosis total disminuye al aumentar la altitud sobre la superficie terrestre debido a que la atenuación de la radiación terrestre ocurre más rápidamente que el incremento en la radiación cósmica.³

Al nivel del mar, la razón de dosis promedio en el aire es de 30 nGy/h (para cualquier latitud) y se incrementa a $4 \text{ } \mu\text{Gy/h}$ a una altitud de 12 km y en altas altitudes.²⁵

La mayor parte de la población mundial vive en ciudades que se encuentran a medio camino entre el ecuador y los polos y cerca del nivel del mar. En el reporte UNSCEAR de 1982, la razón de dosis absorbida en el aire, al aire libre, debida al componente ionizante estimó en 32 nGy/h ; este valor se considera numéricamente igual al de la dosis equivalente efectiva. Dentro de los edificios, las dosis son algo menores debido al efecto protector de las estructuras.²⁵

De acuerdo con numerosas mediciones hechas en edificios construidos con diversos materiales (concreto, madera), rea-

lizadas en casas solas y en casas de departamentos, se considera que el factor de protección promedio es de 0.8. Entonces, la razón de dosis absorbida dentro de edificios y al nivel del mar es de 26 nGy/h.²⁵

Utilizando un valor de factor de calidad de uno para el componente ionizante de los rayos cósmicos y un factor de ocupación dentro de los edificios de 0.8, la dosis equivalente efectiva anual se estima en 240 μ Sv al nivel del mar.²⁵

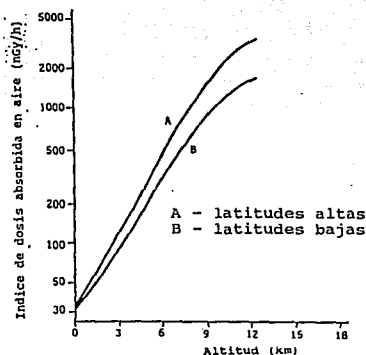


Figura 7. Índices de dosis absorbidas en aire en función de altitud y latitud geomagnética, para el componente ionizante. (UNSCEAR, 1988).

2.1.2. Componente de neutrones

Los protones y los neutrones contribuyen con gran parte del índice de dosis absorbida en la parte alta de la atmósfera, pero los neutrones pierden energía en colisiones elásticas y cuando se termalizan son capturados por el ^{14}N para

formar ^{14}C ; por ello la tasa de fluencia de neutrones se atenúa considerablemente en la parte baja de la atmósfera, y al nivel del mar sólo representa un pequeño porcentaje del índice de dosis absorbida correspondiente a los rayos cósmicos.²⁴

La variación del componente de neutrones de acuerdo con latitud y altitud es similar a la del componente ionizante. Al nivel del mar, la tasa de fluencia de los neutrones es de aprox. $0.008/\text{cm}^2 \text{ s}$. El índice de dosis absorbida promedio se calcula en 0.8 nGy/h , y el de dosis equivalente, en 3 nSv/h para los neutrones incidentes isotrópicamente, lo cual se traduce en un factor de calidad de 3.8. La estimación de 2.4 nSv/h publicada en el reporte UNSCEAR de 1982 y otras realizadas en diversos países reflejan la variabilidad asociada al método de calcular la dosis equivalente efectiva. Despreciando el efecto protector de las estructuras de los edificios, la dosis equivalente efectiva anual para el componente de neutrones se estima en aproximadamente $20 \mu\text{Sv}$ al nivel del mar.²⁵

La distribución de la dosis equivalente efectiva debida a los rayos cósmicos sobre el globo fue recalculada, utilizando las dosis equivalentes efectivas anuales al nivel del mar de $240 \mu\text{Sv}$ para el componente ionizante y de $20 \mu\text{Sv}$ para el componente de neutrones. La figura 8 muestra la variación de la dosis equivalente efectiva anual con la altitud según ecuaciones desarrolladas. Cabe hacer notar que la dosis equivalente debida al componente de neutrones, que es pequeña al nivel del mar, se incrementa más rápidamente que la dosis equivalente debida al componente ionizante y que se convierte

en la parte más importante a altitudes mayores de seis km.

Hay países muy grandes con montañas y costas, como Estados Unidos y la Unión Soviética, en donde los valores no varían mucho porque la mayor parte de los habitantes viven en zonas de baja altitud. Pero cabe mencionar a la Ciudad de México, en la que las exposiciones son altas.

La dosis equivalente efectiva por persona para la población del mundo se estima en $355 \mu\text{Sv}$, contribuyendo el componente ionizante y el de neutrones con 300 y $55 \mu\text{Sv}$ respectivamente.²⁵

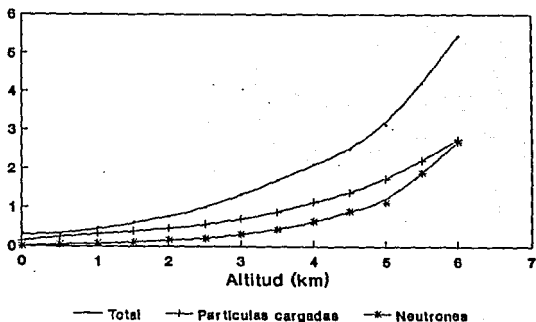


Figura 8. Variación de la dosis equivalente efectiva anual del componente ionizante y del componente de neutrones de los rayos cósmicos, en función de la altitud. (UNSCEAR, 1988).

Exposiciones elevadas

Las exposiciones elevadas resultan de la presencia prolongada en altas altitudes. Las poblaciones que viven en ciudades como Bogotá, Lhasa o Quito, reciben dosis equivalentes efectivas mayores de 1 mSv de los rayos cósmicos. Los pasa-

jeros y los miembros de la tripulación de aviones comerciales están expuestos a dosis mucho mayores, que varían dependiendo de la altitud de vuelo y en menor grado, de la latitud y de la actividad solar.

Para un vuelo dado, las dosis que reciben los pasajeros en las naves subsónicas y supersónicas son aproximadamente las mismas, dado que se compensa la mayor dosis recibida en las naves supersónicas con el tiempo menor de vuelo.²⁵

Considerando que la velocidad promedio de vuelo es de 600 km/h, y que el índice de dosis equivalente efectiva es de $2 \mu\text{Sv/h}$ a 8 km de altitud, la dosis equivalente colectiva anual es de 4 300 sv hombre. La dosis equivalente para el personal de la tripulación es de hasta 65 Sv hombre. Considerando como guía la dosis equivalente colectiva anual para los pasajeros y para la tripulación reportadas en Estados Unidos, la dosis equivalente colectiva anual para las tripulaciones del mundo se calcula en 170 Sv hombre.²⁵

Las dosis de radiación que reciben los astronautas representan una de las limitaciones más importantes a las actividades espaciales largas. Los reportes de las dosis equivalentes que han recibido los astronautas estadounidenses durante los últimos vuelos espaciales varía entre 0.5 y 5 mSv, cifras similares a las obtenidas por los soviéticos. En la mayoría de los casos, las dosis equivalentes efectivas individuales no excedieron de 5 mSv por vuelo; pero para viajes más prolongados (de más de un mes), las dosis equivalentes efectivas fueron de más de 10 mSv y hasta 55 mSv para la expedición del Salut 6, que duró 175 días.²⁵

2.2. Irradiación interna

Diversos radionúclidos se producen por las reacciones de los rayos cósmicos con los núcleos de los átomos presentes en el aire (N, O, Ar) en su mayoría por reacciones de estallamiento y de captura de neutrones. Cierta radiactividad puede añadirse a la ambiental de la tierra del polvo extraterrestre y de los meteoritos, pero esta fuente es bastante pequeña. Aproximadamente 10^7 de polvo bombardean a la Tierra cada año, y su contenido de radiactividad llega a ser hasta de 450 pCi/kg; suponiendo esta máxima concentración, el límite superior de radiactividad proveniente de esta fuente es sólo de 4.5 mCi. $(450 \times 10^{-12} \text{ Ci/kg} \times 10^7 \text{ kg}) = 4.5 \times 10^{-3} = 4.5 \text{ mCi}$. Esta radiactividad se debe principalmente a núclidos ligeros: ^7Be , ^{22}Na , ^{26}Al , ^{46}Sc , ^{48}V , ^{51}Cr , y otros. También se han detectado thorio, uranio y otros elementos pesados en materiales proveniente de meteoritos.¹⁰

La mayor parte de la radiactividad cosmogénica se produce por estallamiento, un proceso en el cual un núcleo se rompe en otros más ligeros por colisión con una partícula altamente energética, usualmente un neutrón.

En la producción de, por lo menos, dos radionúclidos cosmogénicos están implicadas reacciones con neutrones térmicos: la del ^{14}C por la reacción (n,p) sobre el ^{14}N , y la del ^{81}Kr por la reacción (n, γ) sobre el ^{80}Kr . Aunque la mayor parte de los radionúclidos cosmogénicos se producen por interacciones con el aire, una enorme variedad de especies nucleares es potencialmente posible por las reacciones de los rayos cósmicos con la tierra y por fisiones inducidas por los

rayos cósmicos.

Los radionúclidos cosmogénicos (tabla 3) son generalmente elementos ligeros, cuyas vidas medias varían entre algunos minutos y millones de años. Los de vida media más corta generalmente decaen antes de depositarse en la Tierra.

La transferencia a la superficie terrestre se debe en gran parte a asentamiento gravitacional y a procesos de precipitación. Por ello las concentraciones de los radionúclidos cosmogénicos varían significativamente con la altitud, y también con la latitud, no sólo debido al lugar en el que se producen, sino al proceso de mezclado atmosférico. Con todo, a excepción de los elementos que normalmente son gaseosos (los dos isótopos del argón, el tritio y el ^{81}Kr), los núclidos de vida media más corta y el ^{22}Na , virtualmente toda la actividad cosmogénica (99%) se encuentra en los sedimentos oceánicos y en la litosfera.¹⁰

Tabla 3. Principales radionúclidos cosmogénicos

Núclido	Vida media	Veloc.prod. (átomos/cm ² s)	Inventario global(kg)	Princ.núcl. blanco
^3H	12.36 a	0.25	3.5	N,O
^7Be	53 d	0.08	0.0032	N,O
^{10}Be	2700000 a	0.05	3.9×10^5	N,O
^{14}C	5760 a	2.5	6.8×10^4	N,O
^{22}Na	2.6 a	8.6×10^{-5}	0.0019	Ar
^{25}Al	740000 a	1.4×10^{-5}	1000	Ar
^{32}Si	280 a	1.6×10^{-4}	1.4	Ar
^{32}P	14.3 d	8.1×10^{-4}	0.0004	Ar
^{33}P	24.4 d	5.8×10^{-4}	0.0006	Ar
^{35}S	87.9 d	0.0014	0.0045	Ar
^{36}Cl	380000 a	0.0011	1.4×10^4	Ar
^{39}Ar	270 a	0.0056	23	Ar
^{81}Kr	210000 a	10^{-6}	16.2	Kr

Kathren, 1984.

De los radionúclidos cosmogénicos, sólo el ^{14}C y el ^3H contribuyen con cantidades apreciables a la dosis de radiación que recibe el hombre. Aunque el ^7Be , el ^{22}Na y otros núclidos cosmogénicos también pueden estar presentes en los seres vivos y ser fuentes de irradiación interna, los índices de producción y las cantidades producidas -y también con frecuencia las vidas medias- son tan pequeñas, que casi no tienen importancia biológica. Las dosis equivalentes efectivas anuales se estiman en $0.01 \mu\text{Sv}$ para el tritio, $3 \mu\text{Sv}$ para el ^7Be , $12 \mu\text{Sv}$ para el ^{14}C y $0.2 \mu\text{Sv}$ para el ^{22}Na .²⁵

Tabla 4. Datos sobre ^3H , ^7Be , ^{14}C y ^{22}Na presentes en la Naturaleza

Concepto	Radionúclido			
	^3H	^7Be	^{14}C	^{22}Na
Vida media	12.3 a	53.6 d	5730 a	2.62 a
Átomos producidos por tiempo y área de superf. ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)				
- en tropósfera	840	270	11000	0.24
- en atmósfera	2500	810	16000-25000	0.86
Inventario mundial (PBq)	1300	37	8500	0.4
Distribución en %				
- estratósfera	6.8	60	0.3	25
- tropósfera	0.4	11	1.6	1.7
- superficie suelo y biosfera	27	8	4	21
- capas oceánicas mezcladas	35	20	2.2	44
- capas oceánicas profundas	30	0.2	92	8
- sedimentos ocean.			0.4	
Actividad especif. en biosfera (Bq/kg)			230	
Concentr. de activ. en aire ($\mu\text{Bq}/\text{m}^3$)		3000		0.3
Concentr. de activ. en aguas superf. continent. (Bq/m^3)	200-900			

UNSCEAR, 1982.

2.2.1. Tritio

El tritio, el único isótopo radiactivo del hidrógeno, se produce de manera natural en atmósfera, litosfera e hidrosfera. La fuente más importante de tritio natural es la atmósfera, pues resulta de la interacción de los protones y neutrones de los rayos cósmicos con el oxígeno, el nitrógeno y el argón; de éstas, la reacción más importante es el bombardeo de nitrógeno atmosférico por neutrones rápidos:²



para los neutrones cuya energía es mayor de 4.4 MeV.

El inventario mundial de tritio producido por los rayos cósmicos es de 34 MCi, que corresponde aproximadamente a una tasa anual de producción de 4 MCi. Se ha sugerido que durante las erupciones solares se despiden tritio, y también de las estrellas, pero todavía no se ha evaluado la contribución de estas fuentes al inventario.²³

El inventario de tritio alcanzó un máximo aproximado de 3100 MCi en 1963, debido principalmente a las pruebas con armas nucleares que se llevaron a cabo sobre todo entre 1954 y 1962. Esta fuente ha disminuido sustancialmente como resultado del acuerdo de prohibición de las pruebas, firmado en 1963 entre las grandes potencias, y se estima que decaerá al nivel natural aproximadamente en el año 2030.

A pesar del tratado, sí se han realizado pruebas termónucleares bajo la tierra. Y aunque esto no ha aumentado significativamente el inventario del tritio en la atmósfera y en las aguas superficiales, ha formado un inventario de magnitud

desconocida debajo de la tierra en los sitios en que se han realizado las pruebas. Que este inventario contribuya a la exposición de los seres humanos, dependerá de su aislamiento hidrológico.¹⁵

Alrededor del 99% del inventario de tritio, para el cual se considera un valor de 1.3×10^{18} Bq, se convierte en agua tritiada y participa en el ciclo normal del agua.

La vida media del tritio es de 12.36 años. El tritio decae para formar ^3He por emisión de una partícula β , con una energía máxima de 18 keV y una energía promedio de 5.7 keV. Esta radiación β es suficiente para iniciar una reacción entre el tritio y el oxígeno para formar agua tritiada.

A temperatura ambiente, el tritio gaseoso tiende a formar HT al reaccionar con el hidrógeno gaseoso, si éste está presente. El vapor, HTO, se forma rápidamente y es la forma en que el tritio se encuentra con mayor frecuencia en el medio ambiente.

Dada la trascendencia del agua en los procesos vitales, es de especial importancia el intercambio isotópico con el tritio.



A 25° C, la reacción anterior favorece la formación de agua tritiada.

Después de que la radiación cósmica forma átomos de tritio, la reacción inicial más probable es una colisión con el oxígeno para formar el compuesto estable TO_2 . La descomposición fotoquímica repetida del TO_2 y reacciones con el ozono explican las abundancias relativas del HT y del HTO. Una se-

gunda reacción inicial posible es la colisión del tritio con una molécula de H_2 , resultando en un intercambio isotópico.

La altitud tiene una influencia importante en las reacciones que ocurren en la atmósfera. Debajo de 5 km el TO_2 se transforma en HTO. En la región comprendida entre 10 y 40 km, el HT es la forma predominante; y arriba de 40 km, las concentraciones son tan pequeñas, que la fracción de HT relativa al total del tritio es despreciable. La concentración de tritio en el hidrógeno atmosférico es estable, pero varía en el agua de lluvia, dependiendo de la fuente de la cual se forma aquella.¹⁵

La mayor parte del tritio se encuentra en los océanos. El tritio llega a la superficie de los océanos directamente por precipitación, intercambio directo de vapor de agua entre el aire y el agua de mar, o por la liberación de agua tritiada de plantas nucleares o reprocesadoras. Una vez en el océano, el tritio se mezcla e intercambia en la capa superior y más tibia, la que sostiene la mayor parte de la vida marina y tiene una profundidad de entre 50 y 100 metros.¹⁰

Las concentraciones de actividad medidas en las aguas superficiales antes de que comenzaran las explosiones nucleares variaban entre 200 y 900 Bq m^3 en el caso de aguas continentales, y tenían un valor aproximado de 100 Bq/ m^3 en las aguas oceánicas. De acuerdo con el reporte del UNSCEAR de 1982, el valor de la concentración media de actividad del tritio natural en las aguas continentales superficiales es de 400 Bq/ m^3 .

El tritio llega a las cosechas comestibles en forma de

HTO y se incorpora parcialmente a los compuestos orgánicos; así que puede encontrarse en la dieta en estas dos formas.

Como el medio ambiente se ha contaminado con tritio artificial desde la década de 1950, no hay mediciones directas de las concentraciones de tritio natural en los tejidos humanos y es necesario estimar las dosis debidas al mismo a partir de datos indirectos.

Tabla 5. Estimaciones de concentraciones en tejidos y dosis absorbidas del 3H y del 14C

Organo o tejido	Hidrógeno			Carbono		
	Concentración máxima (g kg-1)	Concentración de actividad (Bq kg-1)	Dosis absorbida anual (μ Gy) β	Concentración máxima (g kg-1)	Concentración de actividad (Bq kg-1)	Dosis absorbida anual (μ Gy) β
Gónadas (testículos)	100	0.4	0.01	89	20	5
Pulmón	99	0.4	0.01	100	23	5.7
Médula osca roja	100	0.4	0.01	410	93	24
Células de revestimiento de los huesos			0.01			22
Tiroides	100	0.4	0.01	105	24	5.9
Otros tejidos	105	0.4	0.01	230	52	13

UNSCEAR, 1982.

Para estimar las tasas de dosis absorbida debidas al tritio natural, se supuso que las actividades específicas del tritio en los tejidos eran las mismas que se registraban en las aguas superficiales continentales antes de que se iniciaran las explosiones nucleares; las dosis equivalente efectiva anual obtenida de esta manera, y utilizando la distribución del hidrógeno en el hombre referencia de la ICRP, es de 0.01 μ Sv.

La exposición del hombre al tritio, en forma de agua tritiada, ocurre ya sea por inhalación, ingestión o absorción a través de piel, y el tritio se distribuye rápidamente en el agua extracelular, así como en la intracelular.

El agua expuesta a la atmósfera renueva constantemente su contenido de tritio, de manera que existe un balance entre el índice de renovación y el de decaimiento. Por ello es posible fechar soluciones acuosas que se han aislado del contacto con la atmósfera, midiendo su contenido de tritio.

2.2.2. ^{14}C

De aun mayor importancia bioambiental que el tritio es el ^{14}C , que se ha estudiado extensamente en relación con la biosfera. La mayor parte de la producción se verifica en la estratósfera, por el bombardeo del nitrógeno atmosférico con neutrones que han sido termalizados:



El flujo incidente de neutrones de los rayos cósmicos es aproximadamente de 1 neutrón/seg/cm² de superficie terrestre, y casi todos éstos reaccionan con el nitrógeno para formar el ^{14}C . El índice de producción de átomos de carbono se calcula, a partir de este flujo y de la superficie terrestre, en 1.6 átomos/cm²/seg, y -se cree- permaneció invariable los últimos 15000 años hasta antes de 1954, en que las pruebas con armas nucleares empezaron a perturbar los niveles naturales.³

El carbono es fundamental para los procesos vitales y por ello se encuentra en toda la biosfera. El ^{14}C producido por los rayos cósmicos se oxida a CO_2 , que toman las plantas fotosintéticas, y a ellas se las comen los animales. La muerte y los procesos excretorios de las plantas y los animales llevan al ^{14}C orgánico a ambientes terrestres y acuáticos, donde se mantiene en el depósito activo sujeto a diversos procesos químicos y físicos que pueden convertirlo en carbonatos inorgánicos o en depósitos carbonáceos geológicamente sepultados tales como la hulla y el petróleo, que constituyen el depósito inactivo. La mayor parte del carbono llega finalmente a los océanos, donde está sujeto a la evaporación, a la lluvia, y a otros procesos biológicos. El carbono regresa a la atmósfera no sólo por evaporación, sino por la combustión de los combustibles fósiles, el vulcanismo y los efectos del clima.¹⁰

La anterior es una descripción muy simplificada, pues el ciclo del carbono es altamente complejo y es afectado por diversos y complicados procesos físicos y biológicos que todavía no se conocen bien. El inventario mundial del ^{14}C natural se estima en 310 MCi, distribuidos de la siguiente manera:

Profundidad de los océanos	91.7%
Sedimentos de los océanos	0.4%
Capa oceánica superior	2.2%
Superficie terrestre	4.0%
Tropósfera	1.6%
Estratósfera	0.3%

La cantidad de radiocarbono, así como su dinámica ambiental, está determinada por varios factores, entre los cuales el más importante es la realización de pruebas con armas nucleares -que ha incrementado significativamente la cantidad en el ambiente- y la combustión de los combustibles fósiles con la liberación concomitante de bióxido de carbono. Aunque esto último incrementa la cantidad total de ^{14}C en el ambiente, contiene una concentración muy reducida debido a que el ^{14}C presente en un principio ya decayó casi totalmente después de tanto tiempo de almacenamiento bajo la tierra, así que disminuye la concentración relativa del ^{14}C en el carbono en la superficie terrestre. Esto se conoce como el **efecto Suess**.

En el siglo XIX, el carbono de la superficie terrestre contenía 6.1 pCi de ^{14}C por gramo; debido al efecto Suess, se redujo en un 3.2% para 1950 y en 7% para 1970. Se estima que para el año 2000, la reducción total debida a este fenómeno será de aproximadamente 23%.¹⁰

En 1977 se calculó que el inventario mundial de ^{14}C natural representaba unas 60 veces la cantidad encontrada en la atmósfera, lo cual se tradujo en un valor de 8 599 PBq, que corresponde a una tasa de producción de 1 PBq/año.²⁴

Suponiendo que la actividad específica natural del ^{14}C en el organismo sea de 227 Bq/kg de carbono, y utilizando las concentraciones de carbono en los tejidos indicadas por la ICRP para el "hombre patrón", se obtienen dosis absorbidas anuales en tejidos que oscilan entre 5 y 24 μGy . El equivalente de dosis efectiva anual es de 1 μSv .²⁴

La dosis anual para el hombre debida al ^{14}C constituye casi el 99% de las dosis liberadas por los radionúclidos cosmogénicos, pero estas dosis son pequeñas comparadas con la que se recibe de los rayos cósmicos.

El ^{14}C existe en una concentración de equilibrio con el carbono de las sustancias biológicas vivas en una cantidad constante de 7.5 ± 2.7 pCi/g de C. Después de la muerte no se mantiene el equilibrio de ^{14}C y la concentración disminuye en 50% cada 5 600 años, haciendo así posible utilizar el contenido de ^{14}C en los materiales orgánicos para medir la edad.

2.2.3. ^7Be

Debido principalmente a su corta vida media, la mayor parte del inventario del ^7Be se encuentra en la atmósfera.

Las concentraciones ambientales de ^7Be en las zonas templadas varían entre 100 fCi/m³ (primavera) y 40 fCi/m³ (a fines de otoño), y en el agua de lluvia son de aproximadamente 20 pCi/litro.²³

La principal ruta de incorporación al ser humano es la ingestión de vegetales de hoja comestible, que se traduce en una incorporación anual de unos 50 Bq. Las dosis absorbidas en tejidos halladas mediante cálculos basados en la dosimetría de la ICRP, son de 12 μGy en las paredes del intestino grueso inferior y algo menores en los demás tejidos.²⁴

2.2.4. ^{22}Na

Aunque la tasa de producción y la concentración atmosférica del ^{22}Na son muy pequeñas, las dosis absorbidas anuales estimadas para la incorporación de este radionúclido en el hombre son mayores que las derivadas del ^3H y del ^7Be , debido al comportamiento metabólico del sodio y a las propiedades de decaimiento del ^{22}Na .

Las dosis de ^{22}Na absorbidas anualmente se han calculado con base en una incorporación anual por ingestión de 50 Bq y utilizando dosimetría de la ICRP. Las dosis absorbidas en los tejidos varían entre 0.1 y 0.3 μGy , lo cual corresponde a una dosis equivalente efectiva anual de 0.2 μSv aproximadamente.^{23,24}

Tabla 6. Dosis absorbidas en tejidos a causa de la irradiación interna por ^7Be y ^{22}Na

Organo o tejido	Dosis absorbida anual (μGy)	
	^7Be	^{22}Na β^+
Gónadas	5.7	0.14
Mama		0.13
Pulmón		0.12
Medula ósea roja	1.2	0.22
Células de revés. de los huesos		0.27
Tiroides		0.12
Paredes estómago		0.14
Paredes int. del. Paredes int. grueso	5.4	0.15
Superior	7.3	
Inferior	12.0	0.15
Otros tejidos		0.10

UNSCEAR, 1982.

CAPITULO 3. FUENTES TERRESTRES DE RADIACION

Las fuentes terrestres de radiación son los radionúclidos de muy larga vida que han existido en la Tierra desde su formación, hace varios billones de años, y no han decaído sustancialmente. De estos llamados radionúclidos primordiales los más importantes son el ^{40}K , el ^{87}Rb , el ^{238}U y el ^{232}Th . Estos dos últimos encabezan series de 14 y 11 núclidos importantes, respectivamente, que también contribuyen a las dosis provenientes de fuentes terrestres.²⁵

Tabla 7. Radionúclidos primordiales que no pertenecen a las series

Núclido	Vida media (años)	Abundancia isotópica (%)	Decaimiento	Energía (MeV)
^{40}K	1.3×10^9	0.0118	Beta	1.32
^{50}V	6×10^{14}	0.25	Beta	—
^{87}Rb	4.7×10^{10}	27.83	Beta	0.273
^{113}Cd	9×10^{15}	12.3	Beta	—
^{115}In	5×10^{14}	95.7	Beta	0.49
^{123}Te	1.2×10^{13}	0.87	CE	—
^{138}La	1.1×10^{11}	0.09	Beta	0.27
^{142}Ce	$> 5 \times 10^{16}$	11.1	Alfa	1.5
^{144}Nd	2.1×10^{15}	23.9	Alfa	1.83
^{147}Sm	1.1×10^{11}	15.0	Alfa	2.23
^{148}Sm	8×10^{15}	11.2	Alfa	1.95
^{149}Sm	$> 10^{16}$	13.8	Alfa	<2.0
^{152}Gd	1.1×10^{14}	0.2	Alfa	2.14
^{156}Dy	2×10^{14}	0.06	Alfa	3 (?)
^{176}Lu	2.7×10^{10}	2.6	Beta	0.57, 0.31
^{174}Hf	2×10^{15}	0.17	Alfa	2.5
^{180}Ta	$> 1.6 \times 10^{13}$	0.012	Beta	—
^{187}Re	5×10^{10}	62.5	Beta	0.0026
^{190}Pt	7×10^{11}	0.013	Alfa	3.16
^{204}Pb	1.4×10^{17}	1.48	Alfa	2.6

Kathren, 1984.

Además de los radionúclidos mencionados, el resto de los radionúclidos primordiales son generalmente isótopos de los elementos que se encuentran en la mitad de la tabla periódica, y tienen vidas medias mayores a 10^{10} años (algunos hasta de 10^{15} años). Varios, entre ellos el ^{147}Sm y el ^{152}Gd , son emisores α , pero la mayoría decae por emisión β . En general, los emisores α tienen vidas medias muy largas y emiten partículas α de energías relativamente bajas. Estas vidas medias tan largas resultan en bajas actividades específicas. Además, la mayoría tiene abundancias isotópicas y elementales muy pequeñas y poca captación y concentración biológicas, así que no son importantes en cuanto a la dosis ambiental.¹⁰

La presencia de los radionúclidos primordiales y sus productos de decaimiento en todo ambiente (aire, agua, suelo, rocas y alimentos) y en los seres humanos, resulta en dosis de radiación tanto interna como externa.²⁵

3.1. Irradiación externa

Los radionúclidos naturales que se encuentran en el medio ambiente pertenecen a dos clases generales: los cosmogénicos y los primordiales. Los radionúclidos cosmogénicos, que se producen principalmente por la interacción de los rayos cósmicos con átomos blanco de la atmósfera, no aportan una contribución significativa a la dosis de radiación γ externa a nivel del suelo.^{17,23}

El decaimiento de los radionúclidos naturales produce partículas α , electrones y radiación electromagnética. La radiación externa de los emisores α y β presentes en el suelo o en el aire no contribuye significativamente a la dosis absorbida a los tejidos considerados de interés, puesto que están protegidos por lo menos, por unos cuantos milímetros de piel, que absorbe prácticamente toda la energía de las partículas α y de los electrones emitidos por los radionúclidos naturales; entonces, sólo se considera la contribución de la radiación γ . Cabe notar, sin embargo, que la piel - y en menor grado el cristalino del ojo - reciben dosis más altas que los órganos y tejidos de "interés".^{17,23}

Los tres principales contribuyentes al campo de radiación γ terrestre son el ^{40}K y los miembros de las series del uranio y el thorio. La mayor parte de la radiación γ proviene de los 20 cm superiores del suelo, con una pequeña contribución de los productos del radón presentes en el aire.

Al parecer, la exposición dentro de los edificios es similar a la encontrada al aire libre, debido a un balance entre la protección que dan los materiales de construcción y la geometría de la exposición a los radionúclidos presentes en las paredes cuando el individuo se encuentra dentro de una estructura.¹⁴

Como una primera aproximación, puede considerarse que el campo de radiación externa irradia uniformemente a todo el cuerpo y que el índice de dosis absorbida en tejido es el mismo que en el aire; aunque esto no es real, particularmente en el caso de los emisores externos α y β .¹⁷

3.1.1. Exposición al aire libre

La concentración de los radionúclidos primordiales en el suelo, que guarda relación directa con la exposición al aire libre, está determinada en gran parte por la radiactividad de las rocas fuente y también, aunque en menor grado, por la naturaleza de los procesos implicados en la formación del suelo.²⁴

Las rocas ígneas generalmente exhiben una mayor radiactividad que las rocas sedimentarias, mientras que las metamórficas tienen las concentraciones típicas de las rocas de las cuales derivan. Hay excepciones, sin embargo, pues ciertas rocas sedimentarias, notablemente algunas pizarras y rocas fosfáticas, son altamente radiactivas.

Los principales contribuyentes al índice de dosis absorbida en aire son el ^{208}Tl y el ^{228}Ac de la serie del ^{232}Th mientras que para la serie del ^{238}U , el 99% se debe al ^{214}Pb y al ^{214}Bi , que son productos de decaimiento de vida corta del ^{222}Rn . La energía de los rayos que emiten estos núclidos es hasta de 2.6 MeV pero el suelo los absorbe parcialmente. Para un campo de radiación natural típico, una capa de 30 cm sobre el suelo es la que hace la contribución más importante a la irradiación externa.²³

En la tabla 8 se presentan las concentraciones medias de actividad del ^{40}K , el ^{238}U y el ^{232}Th en el suelo, así como los índices de dosis absorbida en el aire a 1 metro sobre la superficie. Los cálculos son para una densidad de suelo de 1.6 g/cm^3 y un contenido de agua del 10% (se supone que la humedad del suelo atenúa la radiación del potasio y del tho-

rio, pero incrementa la radiación de la serie de uranio pues el agua del suelo inhibe la difusión del radón) y se basan en la suposición de que todos los productos de decaimiento del ^{238}U y del ^{232}Th se encuentran en equilibrio radiactivo con sus precursores. El índice de dosis absorbida terrestre promedio al aire libre por la radiación γ a un metro sobre la superficie del suelo es de 44 nGy/h.²⁵

Tabla 8. Concentración media de actividad de ^{232}Th , ^{238}U y ^{40}K en el suelo y tasa de dosis absorbida en el aire 1 metro sobre la superficie del suelo

Radion. o serie	Índice de dosis por concentr. de activ. en suelo (nGy/h por Bq/kg)	Concentrac. en suelo (Bq/kg)	Índice de dosis absorb. en aire (nGy/h)
^{40}K	0.043	370(100-700)	16(4-30)
^{238}U	0.427	25(10-50)	11(4-21)
^{232}Th	0.662	25(7-50)	17(5-33)

UNSCEAR, 1988.

En diversos países se han realizado encuestas a gran escala, utilizando distintos métodos y tipos de instrumentación, para poder estimar las exposiciones promedio a la radiación γ al aire libre. En la tabla 9 se presentan los resultados de estudios realizados en 23 países, que representan casi a la mitad del mundo. El promedio aritmético de estos resultados es de 55 nGy/h.²⁵

Extensas encuestas realizadas en China dieron como resultado un promedio de 80 nGy/h para el país como un todo; por ello se llevó a cabo después un estudio del suelo y se

encontró que los niveles de ^{40}K , ^{238}U y ^{232}Th en ese país son mucho más altos que los estimados por el UNSCEAR.

Tabla 9. Estimaciones del índice de dosis absorbida en aire, al aire libre, de fuentes terrestres de radiación a 1 m sobre la superficie del suelo

País	Año	N° de mediciones	Índice de dosis absorbida en aire (nGy/h)		Estudio e instrumentación
			Promedio	Rango	
Austria	1980	> 1000	43	20 - 150	Terrestre en áreas pobladas, contador Geiger
Bélgica	1987	272	43	13 - 58	Terrestre, dosímetros termoluminiscentes, espectrómetros gamma y cámara de ionización
Canadá	1984	33 áreas	24	18 - 44	Aéreo con detector de centelleo
China	1986	38661	80	60 - 120 a)	Terrestre con cámaras de ionización y detector de centelleo
Dinamarca	1980	14 sitios	38	17 - 52	Terrestre con cámaras de ionización y espectrómetro gamma
EUA	1972	25 áreas e)	46	13 - 100	Aérea con detectores de centelleo
Finlandia	1980	-	65	-	-
Francia	1985	5142	68	10 - 250	Terrestre con dosímetros termoluminiscentes
Holanda	1985	1049	32	10 - 60	Terrestre con cámara de ionización
Hungría	1987	123 sitios	55	20 - 130	Terrestre con dosímetros termoluminiscentes
Islandia	1982	-	28	11 - 83	-
India	1986	2800	55	20 - 1100 c)	Terrestre con dosímetros termoluminiscentes
Inglaterra	1984	1400	40	0 - 100	Terrestre con contadores Geiger
Irlanda	1980	264	42	0 - 180	Terrestre con cámara de ionización
Italia	1972	1365	57	7 - 500	Terrestre con cámara de ionización
Japón	1980	1127	49	5 - 100	Terrestre con cámara de ionización y detector de centelleo
Noruega	1977	234	73	20 - 1200	Terrestre con cámara de ionización
Polonia	1980	352 sitios	37	15 - 90	Terrestre con dosímetros termoluminiscentes
RDA	1969	1005	85 b)	24 - 270	Terrestre con cámara de ionización
RFA	1978	24739	53	4 - 350	Terrestre con detectores de centelleo
Rumanía	1979	2372	81	32 - 210	Análisis de muestras de suelo por espectrometría gamma
Suecia	1979	-	80	18 - 4000	-
Suiza	1964	-	60 d)	-	Terrestre con cámara de ionización
Taiwan	1972	26	69	-	Análisis de muestras de suelo por espectrometría gamma

a) Rango de los promedios.

b) Al índice de exposición total se le restó una contribución de $1 \mu\text{R/h}$ de lluvia radiactiva por armas nucleares.

c) Rango de los promedios aritméticos para cada provincia.

d) Al índice de exposición total se le restó una contribución de $3.1 \mu\text{R/h}$ de lluvia radiactiva por armas nucleares.

e) Habitadas por aproximadamente el 30 % de la población.

UNSCEAR, 1988.

En la India también se llevaron a cabo extensos estudios en diversas ciudades y el índice de dosis absorbida promedio al aire libre debido a la radiación natural (fuentes terrestres de radiación y radiación cósmica) fue de 785 μGy anualmente. Si se considera que el índice de dosis promedio para los rayos cósmicos es de 300 μGy por año, resulta en un índice de dosis absorbida promedio en el aire debido al componente terrestre, de 55 nGy/h , que es el valor aceptado.²⁵

Existen regiones en el mundo en donde el rango de variación de las dosis de radiación terrestre al aire libre se excede con mucho; entre éstas se encuentran las provincias italianas de Lazio y Campania, y otras zonas en Irán, Francia, Madagascar y Nigeria. Las regiones mejor documentadas son las de la India y las de Brasil. En ciertas costas de la India hay arenas ricas en monazita (que contiene thorio en concentraciones que varían entre 8 y 10.5%). Los índices de dosis absorbidas en el aire en las zonas de Kerala (India) varían entre 150 y 4000 nGy/h , y alcanzan hasta 6000 nGy/h en la zona de Tamil Nadu. En Brasil, los índices varían entre 150 y 1000 nGy/h .²⁵

3.1.2. Exposición dentro de edificios

El conocimiento de los niveles de radiación dentro de los edificios es importante para evaluar la exposición de la población, dado que la mayor parte de las personas pasan mucho tiempo dentro de ellos.

Los materiales de construcción actúan como fuentes de radiación, al tiempo que atenúan la radiación procedente del exterior. Si los materiales de construcción son de origen local, como suele ocurrir, puede suponerse que las concentraciones de radionúclidos naturales presentes en el suelo o en el pavimento que rodea al edificio sean iguales a las de los materiales de construcción. En tales circunstancias, puede considerarse que el valor de la relación entre el índice de dosis absorbida dentro del edificio y fuera de él, varíe entre 1 y 2, debido a cambios en la geometría de la fuente y a la presencia de puertas y ventanas. Los cálculos que toman en cuenta el grosor y las dimensiones de las paredes dan valores de 1.35 para las construcciones de ladrillo y de 1.48 para las de concreto.²⁵

Este valor, combinado con el promedio de índice de dosis absorbida en aire, al aire libre, que es de 55 nGy/h, da un valor de 72 nGy/h como valor para el índice de dosis absorbida dentro de los edificios. Cabe hacer notar que es casi el mismo valor que el que se obtiene por mediciones directas realizadas dentro de los edificios.²⁵

Dosis equivalentes efectivas anuales debidas a la radiación terrestre

El valor del cociente entre el índice de dosis equivalente efectiva y el índice de dosis absorbida en aire se considera de 0.7 Sv por Gy para las exposiciones ambientales de rayos γ de energías moderadas. Se supone que este valor aplica por igual a hombres y mujeres, y para los ambientes dentro

y fuera de los edificios. Considerando un factor de ocupación al aire libre de 0.2, la dosis equivalente efectiva anual de la radiación γ terrestre al aire libre es de:

$$55(\text{nGy/h}) \times 0.7 (\text{Sv/Gy}) \times 8\,760 (\text{h/a}) \times 0.2 = 70 \mu\text{Sv}$$

Para la exposición dentro de los edificios, utilizando un factor de ocupación de 0.8, la dosis equivalente efectiva anual es de:

$$70 (\text{nGy/h}) \times 0.7 (\text{Sv/Gy}) \times 8\,760 (\text{h/a}) \times 0.8 = 340 \mu\text{Sv}$$

La dosis equivalente efectiva total anual (al aire libre más la correspondiente a dentro de edificios) proveniente de la radiación terrestre y promediada para la población mundial, es de 410 μSv . Las contribuciones del ^{40}K y de los radionúclidos de las series del ^{238}U y del ^{232}Th a la dosis equivalente efectiva anual total debida a la radiación terrestre son de 150, 100 y 160 μSv .²⁵

3.2. Irradiación interna

Los radionúclidos primordiales presentes en la biosfera que entran al organismo humano (por ingestión o inhalación) contribuyen de manera significativa a la dosis total que se recibe.

La dosis interna emitida por los radionúclidos naturales procede casi exclusivamente del ^{40}K , el ^{87}Rb , el ^{222}Rn , el ^{220}Rn y de un producto descendiente del radón, el ^{210}Po .²²

Además del ^3H y del ^{14}C , los demás núclidos presentes en la biosfera tienen abundancias mucho menores, usualmente vidas medias mucho más largas (menor actividad específica) y son metabólicamente menos activos.¹⁷

Los radionúclidos pesados son de particular interés debido a que están ampliamente distribuidos en la biosfera y porque ellos, y muchos de los radionúclidos de vida corta que pertenecen a las series radiactivas, son emisores α . No sólo porque las partículas α son más energéticas que las β y que los rayos γ , sino porque sus efectos biológicos son mayores.¹⁷

Los isótopos siguen el metabolismo normal del elemento y los radionúclidos de vida larga se mantienen usualmente en una concentración de equilibrio o se incrementan lentamente con la edad. Los radionúclidos de vida corta desaparecen por decaimiento, pero sus concentraciones en el cuerpo se restablecen constantemente por nuevas incorporaciones.¹⁴

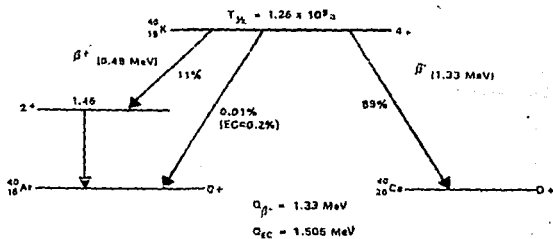


Figura 9. Esquema de decaimiento del ^{40}K . (Kathren, 1984).

3.2.1. ^{40}K

El potasio es la principal fuente natural de dosis de radiación interna, por lo que se le considera el núclido simple de origen terrestre más importante, al menos desde el punto de vista biológico.^{10,23}

El potasio, miembro de la altamente reactiva familia de los metales alcalinos, tiene tres isótopos cuyos números de masa son 39, 40 y 41. De éstos, sólo el ^{40}K es radiactivo y tiene una vida media de 1.3×10^9 años.

El ^{40}K decae a ^{40}Ca (estable) el 89% del tiempo, emitiendo una partícula β de 1.314 MeV en el proceso. Con excepción de una pequeñísima fracción que decae por captura electrónica, el ^{40}K decae por emisión de positrones el 11% del tiempo restante, emitiendo un fotón característico que tiene una energía de 1.460 MeV (figura 9). Este fotón es muy útil en la identificación y cuantificación del ^{40}K por espectrometría γ y constituye un excelente punto de calibración debido a la presencia de potasio en todas las muestras ambientales.¹⁰

La abundancia isotópica del ^{40}K es sólo de 0.0118%, lo cual imparte una actividad específica aproximada de 855 pCi/g de potasio natural.

El potasio es un elemento esencial que se encuentra bajo un estricto control homeostático en el cuerpo. Por ello, la dosis que el cuerpo recibe por este radionúclido es constante, no está influenciada por variaciones en el medio ambiente,⁵ o en la composición de la dieta, que es la principal vía de entrada de este radionúclido.¹⁷

La concentración másica promedio del ^{40}K para un adulto varón es de 2 g/kg de peso corporal. Y de acuerdo a la actividad específica de este radionúclido (855 pCi/g) corresponde a 0.12 μCi de ^{40}K en el cuerpo.¹⁰

La distribución del potasio en varios órganos y tejidos se ha utilizado para determinar las concentraciones del ^{40}K en ellos, así como los índices de dosis absorbidas correspondientes. La dosis absorbida anual más alta (270 μGy) la recibe la médula ósea roja y la dosis más baja (100 μGy), la tiroides (tabla 10). La dosis equivalente efectiva anual se estima en 180 μSv .²⁵

Un estudio realizado con 3 000 personas de entre 1 y 79 años de edad mostró que las concentraciones de potasio en el organismo aumentan desde el nacimiento hasta aproximadamente los diez años (en las niñas) y hasta los 18 años (en los varones) hasta alcanzar valores estimados en 2.1 y 2.3 g/kg de peso, respectivamente. Las concentraciones disminuyen bastante bruscamente hasta los 20 años y de manera más gradual después.¹⁰ La concentración másica de potasio es máxima en los adolescentes varones y mínima en las mujeres ancianas.²⁴ La concentración de ^{40}K en los hombres es entre 25 y 30% mayor que en las mujeres de la misma edad, debido en gran parte a la mayor masa muscular y al menor contenido de grasa en los hombres.³

En el cuerpo, las concentraciones más bajas de potasio se encuentran en huesos y dientes, y en la grasa. Las concentraciones más altas se encuentran en los músculos, que contienen aproximadamente 0.36% de potasio en peso húmedo, lo

cual corresponde a aproximadamente 3 pCi/litro. Comúnmente, los tejidos blandos - los que tienen las concentraciones más altas de potasio, como músculo y gónadas- reciben una dosis aproximada de 19 mrad/año del ^{40}K , de la cual el 85% se debe a las partículas β , y el restante 15% a los fotones.¹⁷ Debido a que se encuentra en todo lugar en el medio ambiente y al fotón de 1.460 Mev asociado a su decaimiento, el ^{40}K también es fuente de una pequeña dosis de radiación externa.¹⁰

El potasio se encuentra ampliamente distribuido en la Naturaleza, en concentraciones que varían de 0.1% en las piedras calizas, a 3.5% para algunos granitos. Ajustando estas cifras a la abundancia natural del ^{40}K , se traduce en unas cuantas decenas de pCi por gramo en la mayor parte de rocas y suelos. En las tierras de cultivo, el contenido de potasio está determinado en gran parte por el uso de fertilizantes. Se estima que en Estados Unidos anualmente se añaden 3 000 Ci de ^{40}K a los suelos en forma de fertilizantes.³

3.2.2. ^{87}Rb

Al igual que el potasio, el rubidio es un metal alcalino, y puede reemplazar al potasio químicamente dentro del cuerpo.

De los dos isótopos del Rb encontrados en la Naturaleza (el ^{85}Rb y el ^{87}Rb) sólo el último es radiactivo, está presente en el rubidio elemental en un 27.8% y tiene una vida media de 4.8×10^{10} años.⁵ El ^{87}Rb es un emisor β puro y la energía máxima de su radiación es de 0.274 Mev.¹⁰

Se sabe muy poco del comportamiento del rubidio en el medio ambiente. Se han hecho pocas mediciones de este elemento en alimentos y en el cuerpo humano, pero parecen indicar que el cuerpo retiene más al rubidio que al potasio. Con base en las concentraciones máxicas del rubidio reportadas por la ICRP, la concentración media de actividad del ^{87}Rb en el cuerpo es de 8.5 Bq/kg. La supuesta distribución del rubidio en varios órganos y tejidos del cuerpo se usa para calcular los índices de dosis absorbidas resultantes. La dosis anual más alta (14 μGy) la reciben las células de revestimiento de los huesos (tabla 10), y la dosis equivalente efectiva anual se estima en 6 μSv .²⁵

Tabla 10. Concentraciones y dosis absorbidas anuales medias en tejidos de varones adultos debidas al ^{40}K y ^{87}Rb

Organo o tejido	Potasio			Rubidio		
	Concentración máxica (g kg ⁻¹)	Concentración de actividad (Bq kg ⁻¹)	Dosis absorbida anual $\beta\text{-}\Gamma$	Concentración máxica (mg kg ⁻¹)	Concentración de actividad (Bq kg ⁻¹)	Dosis absorbida anual $\beta\text{-}$
Gónadas (testículos)	2.1	64	180	20	18	10
Pulmón	2.1	64	180	9.2	8.1	4.5
Médula ósea roja	4.4	130	270	7.8	7.0	7.0
Células de revestimiento de los huesos			140			14
Tiroides	1.1	33	100	6.0	5.3	3.0
Otros tejidos	2.0	61	170	7.8	7.0	4.0

UNSCEAR, 1982.

Lo mismo que el potasio, el rubidio se encuentra distribuido en pequeñísimas cantidades en suelos y rocas. Comúnmente, las rocas contienen entre 10 y 200 ppm; los granitos son los que tienen las máximas concentraciones (tabla 11). En la mayoría de los suelos, las concentraciones del ^{87}Rb son del orden de 10 ppm.¹⁰

Las concentraciones del rubidio en plantas son tres o cuatro veces menores que las del potasio. Pero como el rubidio no se encuentra bajo control homeostático, los cambios en la dieta pueden alterar sus concentraciones en el cuerpo.¹⁷

Tabla 11. Contenido promedio de radio, uranio, thorio y potasio en varias rocas

Tipo de roca	^{226}Ra (pCi/g)	^{238}U (pCi/g)	^{232}Th (pCi/g)	^{40}K (pCi/g)
Igneas	1.3	1.3	1.3	22
Sedimentarias				
Arenisca	0.71	0.4	0.65	8.8
Pizarra	1.08	0.4	1.1	22
Calizas	0.42	0.4	0.14	2.2

Eisenbud, 1987.

3.2.3. Serie ^{238}U

El ^{238}U es la cabeza de una serie de 14 núclidos principales (fig. 10). El número de masa de todos estos núclidos es divisible entre 4 y sobran 2 (serie $4n + 2$). El ^{238}U sufre decaimiento α y su vida media es de 4.47×10^9 años. El producto estable de esta serie es el ^{206}Pb .²

Esta serie puede dividirse en subseries en las que la actividad del precursor controla en gran medida la actividad

de los productos de decaimiento y son: $^{238}\text{U} \longrightarrow ^{234}\text{U}$; ^{230}Th ; ^{226}Ra ; $^{222}\text{Rn} \longrightarrow ^{214}\text{Po}$ y $^{210}\text{Pb} \longrightarrow ^{210}\text{Po}$.

En la tabla 12 se presentan los tres isótopos naturales del uranio, así como sus abundancias respectivas.

La radiactividad específica del uranio es lo suficientemente baja como para que en cantidades menores a un kg pueda tratarse sin ninguna precaución radiológica particular.²

Tabla 12. Composición y radiactividad del uranio natural

	Gramos/kg de U natural	MBq/kg de U natural	MBq/kg de U natural y desc. en equilibrio
^{238}U	992.8	12.2	170 (96 de los cuales son α)
^{235}U	7.15	0.3	4 (2.6 de los cuales son α)
^{234}U	0.05	12.2	Incluida en ^{238}U

OIEA, 1984.

El uranio no es un elemento muy raro; se encuentra por lo menos en 60 minerales conocidos y distribuidos por toda la Tierra. En la corteza terrestre su concentración aproximada es de 2.7 ppm, lo cual lo hace tan abundante como el arsénico o el boro.^{2, 10} Las rocas fosfáticas, que se utilizan mucho como fertilizantes, pueden contener hasta más de 120 ppm. También hay uranio en el carbón, de manera que está presente en las cenizas de carbón y en los efluentes de las plantas de carbón.¹⁰

El mineral más importante es la uraninita, en el que la concentración de uranio varía entre 50 y 90%. Otro mineral

importante que contiene aproximadamente 54% de uranio es la carnotita.²

Un hombre típico contiene entre 100 y 125 μg de uranio. La ingesta y la excreción diarias son de aproximadamente $1\mu\text{g}$ (a través de alimentos y de heces, respectivamente).¹⁰

Subserie del ^{238}U

De acuerdo con el UNSCEAR (1988), el uranio consiste de ^{238}U en equilibrio radiactivo con ^{234}Th , $^{234\text{m}}\text{Pa}$ y ^{234}U , de manera que un kg de uranio contiene 12 MBq de cada uno de estos núclidos.

En la atmósfera, la principal fuente natural de uranio, así como la de cualquier otro precursor de alguno de los isótopos del radón, es la constituida por partículas de polvo en suspensión provenientes de la superficie terrestre. La incorporación anual promedio en adultos, por inhalación, es de 0.01 Bq (tabla 13).

La ingesta dietética anual del ^{238}U es más o menos de 5 Bq en áreas de actividad natural "normal". La contribución del agua potable a este valor varía ampliamente. Si el consumo promedio diario de agua es de 0.5 litros y se considera que el agua contiene aproximadamente 25 Bq de ^{238}U por m^3 , el promedio anual de incorporación es de 5 Bq, el mismo valor que el encontrado para la ingesta de alimentos.²⁵

El valor promedio de las concentraciones de actividad del ^{238}U en huesos de adultos que han vivido en zonas de radiación "normal" se estima en 50 mBq/kg. En los tejidos blan-

dos, a excepción de los pulmones, las concentraciones son menores. La dosis absorbida anual es de $1 \mu\text{Gy}$ en las células de revestimiento de los huesos, y la dosis equivalente efectiva anual correspondiente es de $5 \mu\text{Sv}$.²⁵

^{230}Th

El ^{230}Th tal vez sea el contribuyente más importante a la dosis a pulmón que se recibe por la inhalación de polvos que contienen uranio.¹⁰

La incorporación de ^{230}Th por la dieta en Estados Unidos se calcula en 2 Bq/año . El thorio es un osteófilo, tiene un largo tiempo de residencia en esqueleto y se concentra en la superficie de los huesos. La dosis equivalente efectiva anual recibida por este radionúclido es de $7 \mu\text{Sv}$. Las dosis a médula ósea y células de revestimiento de los huesos serían mucho menores si la actividad de este radionúclido se distribuyera uniformemente sobre el esqueleto.²⁵

^{226}Ra

El ^{226}Ra es otro miembro importante de esta serie pues su descendiente, el ^{222}Rn , es un gas que se difunde en tierra y aire. El ^{226}Ra (un emisor α) y sus productos de decaimiento, son responsables de una gran parte de la dosis recibida por los humanos de los emisores internos naturales.

La concentración de los dos principales isótopos del radio, el ^{226}Ra y el ^{228}Ra (progenia del uranio y del thorio,

respectivamente) está influenciada por factores geológicos y geoquímicos. Hay más ^{232}Th que ^{238}U en la Naturaleza con respecto a actividad, pero algunos factores geoquímicos provocan concentraciones locales de uranio, lo cual con frecuencia resulta en mayores cantidades de ^{226}Ra en relación al ^{228}Ra .³

El ^{226}Ra se encuentra también en pequeñas concentraciones en la atmósfera, en cuyo caso las fuentes son humos y cenizas volcánicas, incendios forestales, meteoritos y la combustión del carbón.¹⁰

A diferencia del uranio y del thorio, el radio es soluble y forma fácilmente compuestos que absorben las plantas; así, a través de la cadena alimentaria, pasa a los seres humanos. Puesto que el origen del radio en los alimentos es el suelo y el contenido de radio en él es variable, el contenido de radio en los alimentos también es muy variable.³

Los alimentos son una fuente más importante que la inhalación en la incorporación de radio. El estimado de la ingesta dietaria anual promedio para el ^{226}Ra en áreas de fondo normal se considera de 15 Bq. La contribución del agua es pequeña cuando las fuentes del agua son superficiales; pero en aguas de pozos profundos, que en muchos países abastecen a la mayor parte de la población, las concentraciones de ^{226}Ra varían mucho y son comunes los niveles de hasta 200 Bq/l. En Estados Unidos, la media geométrica de las concentraciones de ^{226}Ra en los abastecimientos públicos de agua es de 22 Bq/m³, lo cual da lugar a una incorporación anual de 4 Bq, si se supone un consumo diario de medio litro de agua.²⁵ Las regulaciones de la EPA sugieren que se limite el contenido del

^{226}Ra en el agua potable a 5 pCi/litro, lo cual puede requerir que se traten ciertas aguas de pozo.³

Cuando el radio entra al cuerpo, su comportamiento metabólico es similar al del calcio y una fracción considerable se deposita en hueso (más del 70%); el resto se distribuye más o menos uniformemente en los tejidos blandos.²⁵

Para estimar las dosis anuales absorbidas por los tejidos por el ^{226}Ra y sus productos de decaimiento, es necesario conocer la fracción de radón retenida por el tejido en que se deposita, puesto que la mayor parte de la dosis se debe a las emisiones α del decaimiento del radón y sus descendientes. Se asume un factor de retención promedio de 0.33 del ^{222}Rn en el esqueleto (así como en los tejidos blandos) y que la concentración del radio y sus productos de decaimiento es uniforme sobre la masa de hueso. Los resultados muestran que las dosis absorbidas promedio anuales son menores de 1 μGy en todos los órganos y tejidos, a excepción de las células de revestimiento del hueso. La dosis equivalente efectiva anual que resulta de la incorporación del ^{226}Ra en zonas normales es de aproximadamente 7 μSv .²⁵

La incorporación anual aproximada de ^{226}Ra para la gente que vive en zonas de alta radiación natural es de 200 Bq; por ejemplo, la dosis equivalente efectiva anual correspondiente a la región de Araxa-Tapira, en Brasil, varía entre 65 y 250 μSv .²⁵

En comparación con el uranio y el thorio, las plantas toman con relativa facilidad el radio, aunque no tan bien como el calcio. Una excepción es el caso de las nueces de

Brasil, que acumulan selectivamente radio y bario, y contienen hasta 7.1 pCi/g.¹⁰ La concentración de radio en ellas es casi mil veces la que se encuentra en los alimentos de la dieta promedio de Estados Unidos.³

²²²Rn y sus productos de decaimiento de vida corta (²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi y ²¹⁴Po)

En las tablas 13 y 14 se presentan las incorporaciones anuales y la dosis equivalente efectiva para la exposición a los núclidos de esta subserie. En el siguiente capítulo se trata con mayor detalle este tema.

²²²Rn y sus productos de decaimiento de vida larga (²¹⁰Pb, ²¹⁰Bi y ²¹⁰Po)

Esta subserie es un componente importante a la dosis por irradiación interna provocada por los emisores α .²³

La principal fuente de ²¹⁰Po en la atmósfera es la emanación de ²²²Rn del suelo.

Considerando que las concentraciones en aire son iguales dentro que fuera de las construcciones, la incorporación anual por inhalación para quienes no fuman es de 4 Bq de ²¹⁰Pb y de 0.3 Bq para el ²¹⁰Po. Un cigarro contiene más o menos 20 mBq de ²¹⁰Pb y 15 mBq de ²¹⁰Po, y ambos son volátiles a la temperatura de combustión del tabaco. Aproximadamente el 10% del ²¹⁰Pb y el 20% del ²¹⁰Po que contienen los cigarrillos entran a pulmón. Así que para una persona que fuma 20

cigarrillos al día, las concentraciones en pulmón aumentan en un factor de 5 para el ^{210}Pb y de 3 para el ^{210}Po .^{24,25}

Debido a su corta vida media (5.01 días) la concentración de actividad del ^{210}Bi es igual a la del ^{210}Pb , ya que se supone que se encuentran en equilibrio radiactivo en los tejidos corporales; esto implica que las dosis absorbidas del ^{210}Bi se deben principalmente a la ingesta del ^{210}Pb y no a la del ^{210}Bi .²⁵

El consumo de alimentos es generalmente la vía de entrada al cuerpo más importante para el ^{210}Po y el ^{210}Pb . Las concentraciones de estos radionúclidos son similares: bajas en la carne y en la leche, intermedias en cereales y verduras y relativamente altas en animales marinos. Las incorporaciones anuales reflejan la composición de la dieta y son de 20 Bq en Estados Unidos, de 40 Bq en la República Federal Alemana y de 200 Bq en Japón.²⁵

Las concentraciones del ^{210}Pb en el agua son casi siempre bajas y su contribución no es importante a la ingesta total.²⁵

Un caso bien documentado de elevada ingesta es la de las personas que viven a base de carne de reno o de caribú en las regiones árticas y subárticas del hemisferio norte; la carne de estos animales es extremadamente alta en ^{210}Po y en ^{210}Pb porque en invierno estos animales pastan en líquenes, que acumulan estos radionúclidos. La incorporación anual para estas personas es más o menos de 140 Bq del ^{210}Pb y 1 400 Bq por el ^{210}Po .²⁵

El plomo es un elemento osteófilo y tiene un largo

tiempo de residencia en el esqueleto.²⁵ A diferencia de otros emisores α naturales, el ^{210}Po se distribuye en tejidos blandos y no en huesos.³ Entonces, la mayor parte de la actividad del ^{210}Po en huesos procede de la desintegración del ^{210}Pb depositado.²⁴

Las dosis absorbidas de esta subserie dependen básicamente de las partículas α altamente energéticas del ^{210}Po , ya que la contribución de las emisiones β del ^{210}Pb y del ^{210}Bi sólo constituyen un 10% del total. La dosis equivalente efectiva anual que deriva de la incorporación de ^{210}Pb , ^{210}Po , y ^{210}Bi es de aproximadamente 120 μSv . Para quienes comen carne de reno o de caribú esta cifra es unas diez veces mayor.²⁴

Tabla 13. Incorporaciones de ^{238}U y ^{232}Th y de sus productos de decaimiento en áreas normales

Fuente	Incorporación anual (Bq)	
	Inhalación	Ingestión
Serie ^{238}U		
^{238}U	0.01	5
^{230}Th	0.01	2
^{226}Ra	0.01	15
^{222}Rn	200000	300
^{210}Pb	4	40
^{210}Po	0.3	40
Serie ^{232}Th		
^{232}Th	0.01	2
^{228}Ra	0.01	15
^{220}Rn	100000	

UNSCEAR, 1988.

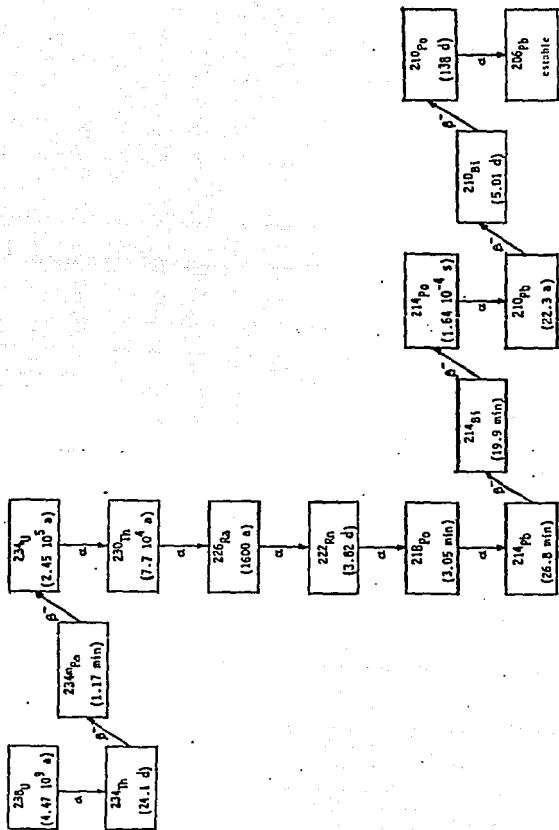


Figura 10. Serie de decaimiento del ^{238}U . (UNSCEAR, 1988).

3.2.4. Serie ^{232}Th

La serie del thorio consiste en un grupo de radionúclidos relacionados a través de su decaimiento, en el que todos los números de masa son divisibles entre 4 (serie 4n), y tiene su origen en el ^{232}Th . El núclido terminal de esta serie es el ^{208}Pb estable. La transformación del ^{232}Th al ^{208}Pb requiere de seis decaimientos α y cuatro decaimientos β .² Esta serie también incluye radionúclidos ambientalmente importantes y, al igual que la serie del uranio, contiene un isótopo radiactivo del gas radón, el ^{220}Rn .

Esta serie se ha dividido en tres subseries: el ^{232}Th mismo; $^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{224}\text{Ra}$; y $^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$. Para cada subserie, en las tablas 13 y 14 se encuentran las incorporaciones estimadas, así como las dosis absorbidas anuales.²⁵

El thorio natural consiste 100% del isótopo ^{232}Th . La radiactividad específica del thorio es aun menor que la del uranio, de manera que generalmente se trata como un elemento no radiactivo.²

El thorio es más común en la Naturaleza que el uranio, con un contenido promedio en la corteza terrestre de 12 ppm (como comparación, la abundancia promedio del plomo es de 16 ppm en la corteza terrestre).²

El contenido de thorio en las rocas ígneas es aproximadamente cuatro veces el del uranio, pero como la actividad específica del ^{232}Th es de 0.11 pCi/g, en comparación con 0.33 pCi/gramo del ^{238}U , la radiactividad debida a los dos núclidos es casi de 1:1.^{3,10}

El mineral más común que contiene thorio es la monazita

y tiene entre 1 y 15% de ThO_2 . La monazita es un mineral insoluble de tierras raras constituido en su mayoría por fosfatos de cerio, lantano y thorio. Los depósitos naturales más grandes de este mineral se encuentran en la India, Brasil, Unión Soviética, Estados Unidos y Canadá.² Las dosis recibidas en estas áreas son de hasta varios mrad/h, en contraste con aproximadamente 10 $\mu\text{rad/h}$ que se reciben en áreas con fondo terrestre normal. A pesar de las altas dosis, que en algunos casos sobrepasan los niveles máximos permitidos para la exposición ocupacional, no existen registros documentados de efectos nocivos en los residentes.¹⁰

Debido a su relativa insolubilidad y a su baja actividad específica, la cantidad de ^{232}Th presente en materiales biológicos es insignificante. Diversos estudios muestran que las mayores concentraciones de thorio se encuentran en nódulos y en pulmones, lo cual indica que la principal fuente de exposición para el hombre es la inhalación de partículas suspendidas. Debido a que este radionúclido se elimina muy lentamente, las concentraciones tanto de ^{230}Th (de la serie del uranio) como del ^{232}Th , tienden a incrementarse con la edad.³

La concentración de actividad del ^{232}Th en el suelo se estima en 25 Bq/kg, la misma que la del ^{238}U y su producto de decaimiento, el ^{230}Th . Con base en mediciones realizadas en Estados Unidos, se estima que el contenido de ^{232}Th en el cuerpo es de aproximadamente 80 mBq, 60% del cual se encuentra en el esqueleto. La dosis equivalente efectiva anual para este radionúclido se estima en 3 μSv , considerando que el ^{232}Th permanece en la superficie de los huesos.²⁵

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Subserie ^{228}Ra (^{228}Ra , ^{228}Ac , ^{228}Th y ^{224}Ra)

El radio es mucho más asequible a las plantas y animales que el ^{232}Th , de manera que las concentraciones de actividad del ^{228}Ra en los humanos se deben principalmente a la incorporación del ^{228}Ra y no al decaimiento del ^{232}Th en el cuerpo.²⁵

En esta subserie el ^{228}Th y el ^{224}Ra , ambos emisores α , son los contribuyentes más importantes a la dosis.

La ingestión es primordialmente a través de la comida, siendo la incorporación anual aproximada de actividad por esta vía de 15 Bq en las zonas de radiación de fondo normal, y de hasta 2 000 Bq en la zona de Kerala en la India.²⁵

Se ha demostrado que aproximadamente el 80% del ^{228}Th del organismo se encuentra en hueso.

Las dosis absorbidas anuales en tejidos se han calculado suponiendo que la actividad del ^{220}Rn procedente del decaimiento del ^{224}Ra se retiene en el cuerpo, y que las concentraciones de ^{228}Ra y sus productos de decaimiento son uniformes en la masa total de hueso. La dosis equivalente efectiva anual para la subserie se calcula en 13 μsv .²⁵

^{220}Rn y sus productos de decaimiento (^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{212}Po y ^{208}Tl)

Al igual que en el caso del ^{222}Rn , la inhalación es la principal ruta a través de la cual los humanos están expuestos al ^{220}Rn (thorón) y sus productos de decaimiento de vida corta.²⁵

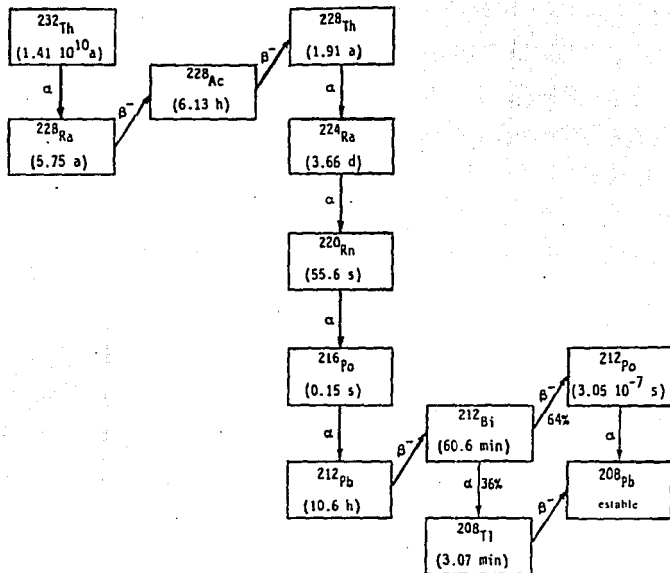


Figura 11. Serie de decaimiento del ^{232}Th . (UNSCEAR, 1988).

El índice de intercambio de aire dentro de los edificios siempre es mucho menor que la constante de decaimiento del thorón (vida media = 55.6 s), de manera que su concentración en el aire es relativamente insensible al valor del índice de ventilación. La concentración de thorón en el aire dentro de los edificios está determinada por el índice de emanación del suelo y de los materiales de construcción.²⁵

Tabla 14. Dosis absorbidas anuales resultantes de la irradiación interna de los emisores α de las series del 238 U y 232 Th

Fuente	Gónadas	Pecho	Pulmones	Médula roja ósea	Células de Revest. de los huesos	Tiroides	Riñones	Hígado	Otros tejidos	Dosis equivalente efectiva (μ Sv)
Series del 238 U										
238 U -> 234 U	0.32	0.09	0.69	0.17	1.2	0.09	0.23	0.14	0.09	5
230 Th	0.007	0.00	0.47	0.56	7.4	0.007	0.24	0.02	0.007	7
226 Rn a)	0.17	0.17	0.17	0.48	5.4	0.17	0.17	0.17	0.17	7
222 Rn -> 214 Po			630 b)							850
			80 c)							
210 Pb -> 210 Po	5.4	5.4	2.7	5.1	36	5.4	5.4	5.4	5.4	120
Series del 232 Th										
232 Th	0.003	0.00	0.4	0.17	2.0	0.003	0.06	0.04	0.003	3
228 Ra -> 224 Ra	0.08	0.08	2.4	0.35	4.4	0.08	1.6	0.8	0.08	13
220 Rn -> 208 Pb	0.3	0.3	44	2.5	28	0.3	19	3.2	0.3	160
Total d)	31	18	970	22	51	4	32	12	22	1160

a) Incluye las dosis resultantes de la formación de 222 Rn y sus productos de decaimiento de vida corta en el cuerpo por decaimiento del 226 Ra, considerando un factor de retención de 0.3

b) Arbol traqueo-bronquial

c) Pulmones

d) Contribuciones a la dosis equivalente anual (μ Sv)

UNSCEAR, 1988.

El thorón, un gas noble, está constantemente presente en el aire que entra a los pulmones, en la misma concentración que se encuentra en el aire inhalado; además, se disuelve parcialmente en el tejido pulmonar. Debido a su corta vida media, no se alcanza un equilibrio en otros tejidos. Entonces, el decaimiento del thorón y del ^{216}Po (vida media = 0.15 s) da lugar a una dosis principalmente en pulmón. En cambio, el ^{212}Pb se transfiere principalmente a células sanguíneas, riñones y superficie de los huesos.²⁴

La dosis equivalente efectiva promedio anual que resulta de la inhalación del thorón dentro y fuera de los edificios se estima en $160 \mu\text{Sv}$.²⁵

El thorón, un gas noble, está constantemente presente en el aire que entra a los pulmones, en la misma concentración que se encuentra en el aire inhalado; además, se disuelve parcialmente en el tejido pulmonar. Debido a su corta vida media, no se alcanza un equilibrio en otros tejidos. Entonces, el decaimiento del thorón y del ^{216}Po (vida media = 0.15 s) da lugar a una dosis principalmente en pulmón. En cambio, el ^{212}Pb se transfiere principalmente a células sanguíneas, riñones y superficie de los huesos.²⁴

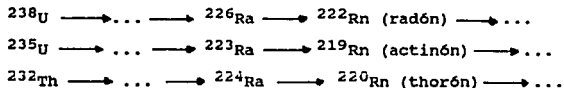
La dosis equivalente efectiva promedio anual que resulta de la inhalación del thorón dentro y fuera de los edificios se estima en $160 \mu\text{Sv}$.²⁵

CAPITULO 4. RADON

Durante los últimos años ha aumentado continuamente la preocupación por los potenciales problemas de salud que pueden ser causados por el radón y otros contaminantes, sobre todo en el medio ambiente dentro de los edificios.

Se estima que la exposición a los productos de decaimiento de vida corta del radón da lugar, en promedio, a la mitad de la dosis equivalente efectiva que procede de todas las fuentes de radiación natural, y que en algunos casos las dosis son lo suficientemente altas como para causar inquietud en cuanto a la salud del ser humano.²⁵

Los radionúclidos que se forman dentro de las tres series naturales de decaimiento son principalmente radioisótopos de metales pesados (U, Th, Ra, Po, Bi, Pb). En cada una de estas cadenas de decaimiento existe un vínculo, que es un radioisótopo del gas noble radón (Rn):



De especial importancia son la liberación del ${}^{222}\text{Rn}$, que tiene una vida media radiactiva de 3.8 días, y la del ${}^{220}\text{Rn}$, cuya vida media es de 55 s. En comparación con los anteriores, la contribución del actinón es insignificante debido a su corta vida media (3.9 s) y a la tan baja relación ${}^{235}\text{U}/{}^{238}\text{U}$, que es de 0.00725 en el uranio natural.⁸

El ${}^{222}\text{Rn}$ es un gas noble inerte, que no tiene compuestos químicos naturales. Por ser el descendiente inmediato del

^{226}Ra , se produce continuamente dondequiera que exista éste.⁵

Debido a que es un gas noble, el radón es más libre de migrar que sus padres y sus descendientes, todos ellos metales. El radón que emana de la superficie terrestre a la atmósfera se dispersa rápidamente y se diluye por convección vertical y turbulencia. Pueden existir niveles considerablemente más altos de radón si éste se libera en espacios cerrados, tales como las minas subterráneas y las casas. Las concentraciones de radón en el aire dentro de los edificios varían considerablemente, de unos cuantos a miles de Bq/m^3 .⁸

El radón decae a una secuencia de radionúclidos de vida corta, como se muestra en la figura 12. Por ello, la liberación de radón al aire da lugar a un aumento gradual de estos descendientes en el aire. La mayoría de estos núclidos, que son radioisótopos del Po, Bi y Pb, se unen a partículas de polvo, formando así un aerosol radiactivo. Debido a la deposición en la superficie y a la ventilación, no se alcanza un equilibrio radiactivo entre el radón y sus descendientes en espacios confinados.⁸

4.1. Concentraciones al aire libre

El radón entra a la atmósfera principalmente al cruzar la interfase suelo-aire, aunque hay otras fuentes menores, como el océano, las aguas profundas, el gas natural y la combustión del carbón. Las concentraciones de radón en la atmósfera y el grado de equilibrio con sus productos de decaimiento a nivel del suelo, están determinados por el índice de

emanación y por procesos de dilución atmosférica, ambos afectados por condiciones meteorológicas.²⁵

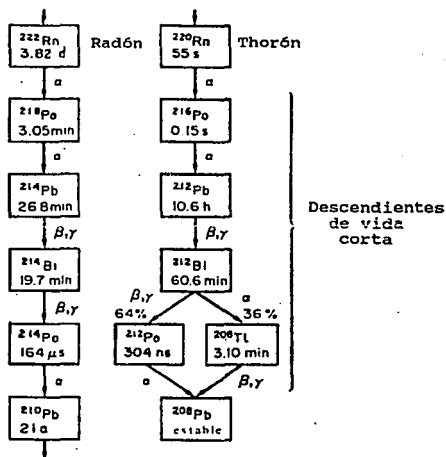


Figura 12. Cadenas de decaimiento del ^{222}Rn y del ^{220}Rn . (ICRP No. 50. 1987).

Cuando el ^{226}Ra decae en las partículas de suelo, los átomos de ^{222}Rn resultantes escapan de estas partículas a poros llenos de aire y se difunden a través de éstos para poder entrar a la atmósfera, así que sólo una parte llega a la superficie antes de decaer. La fracción del radón formado en el suelo que escapa en los poros, se conoce como poder de emanación; los valores reportados varían entre 1 y 80%.²⁵

El poder de emanación de un material sólido depende de

la porosidad, que, a su vez, está influenciada por la humedad del mismo; la difusión es considerablemente menor en suelos húmedos. ^{3,10} También afecta la historia del material, que determina si el radio se encuentra cerca de la superficie de las partículas.¹⁶

Las concentraciones de radón en el aire varían dependiendo del lugar, tiempo, altura sobre el suelo y condiciones meteorológicas. También la localización geográfica es importante: como regla, las concentraciones de radón son menores sobre islas, regiones árticas y océanos que sobre las zonas templadas continentales, y por supuesto, son mucho mayores en áreas en las que el suelo es rico en ²²⁶Ra.^{3,10}

Debido a su corta vida media y a que procede del suelo, el radón en la atmósfera exhibe un gradiente de concentración que varía de un máximo en la interfase suelo-aire a un valor infinitamente bajo en la estratósfera. Los cambios más pronunciados se presentan entre 1 y 200 cm sobre la superficie del suelo, pero siguen siendo importantes para los primeros metros. Por lo mismo, los niños pequeños que respiran a una altura de 50 cm, por ejemplo, están expuestos a una concentración 16% más alta de radón que los adultos que respiran a 1.5 metros.⁵

Los resultados de un estudio en que se midieron las concentraciones de radón cada hora y durante seis años, mostraron que, al nivel del suelo, el promedio es de 8 Bq/m³. Este mismo estudio mostró que las concentraciones son máximas durante el verano y mínimas durante el invierno (figura 13). Estas variaciones se deben en mucho a la humedad del suelo.¹⁰

La variación diurna mostró un máximo durante la noche y un mínimo en la madrugada.²⁵ Las variaciones diurnas en la concentración de radón se ascriben a cambios en la estabilidad atmosférica. Las inversiones térmicas atmosféricas que ocurren en las mañanas dan lugar a una atmósfera extremadamente estable, que restringe el mezclado vertical y provoca niveles altos de radón cerca del suelo. A mediodía, cuando el Sol calienta la atmósfera baja, la concentración de radón declina; estas concentraciones permanecen bajas hasta la tarde, cuando el enfriamiento de la superficie incrementa la estabilidad atmosférica y aumentan nuevamente las concentraciones de radón.⁵

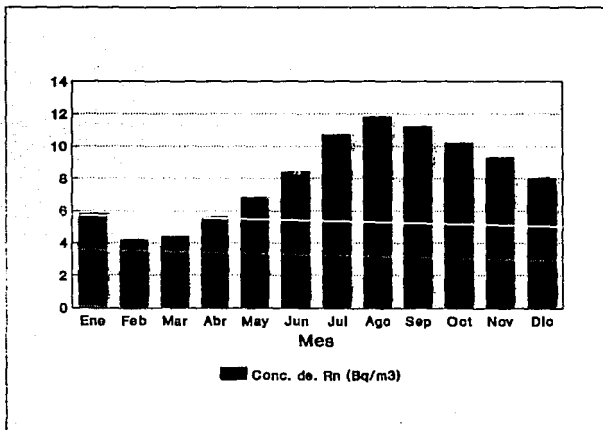


Figura 13. Variación estacional de la concentración de radón al aire libre, en Chester, N.J. (1977-1982). UNSCEAR, 1988.

Considerando el ciclo diurno, el valor promedio del radón atmosférico al aire libre, para áreas normales de Estados Unidos se estimó en 9 Bq/m^3 ; pero este valor probablemente sólo es representativo de las áreas continentales y latitudes templadas. Los valores sobre islas y costas son generalmente de dos a cuatro veces menores. Se estima tentativamente que el valor de la concentración promedio de radón/año para la población, al aire libre, es de 5 Bq/m^3 .²⁵

En la atmósfera, el radón da lugar a una variedad de productos de decaimiento. Puesto que el decaimiento implica una transformación nuclear repentina, estos productos están cargados eléctricamente cuando se forman y rápidamente se unen a partículas de polvo presentes en la atmósfera.^{3,10} Si los gases radiactivos coexisten con el polvo en la misma masa de aire durante el suficiente tiempo, los padres y los descendientes llegan a un equilibrio radiactivo.³

El ^{222}Rn puede moverse independientemente grandes distancias y mantener una concentración significativa en la atmósfera durante días. Pero sus productos de decaimiento de vida corta, que son los de interés en cuanto a la exposición al hombre, no tienen existencia independiente en la atmósfera. Su vida media de aproximadamente media hora no permite mantener una concentración significativa durante mucho tiempo cuando se separan de su precursor, así que la concentración del radón y su variabilidad constituyen indicadores de la posible dosis de radiación a pulmón derivada de sus productos de decaimiento.¹⁶

4.2. Concentraciones dentro de edificios

Básicamente no existe diferencia entre el comportamiento físico del radón y sus productos de decaimiento dentro y fuera de los edificios, pero debido a la diferente naturaleza de algunas de las fuentes y a la magnitud de la exposición dentro, ameritan una discusión por separado.

Para determinar el índice de entrada del radón es necesario considerar la velocidad a la que se genera en los materiales fuente, los modos en que se transporta a través de ellos y la manera en que entra al aire del interior de las estructuras.²⁵

Las fuentes de radón y sus descendientes en el aire dentro de los edificios son:

1. La emanación de radón de los materiales de construcción.
2. La afluencia de radón del suelo.
3. La infiltración de radón del aire exterior debido a la ventilación.
4. El radón liberado de los abastecimientos de agua y del gas natural que se usa para cocinar y en la calefacción.

Generalmente, sólo las tres primeras son importantes; las dos últimas fuentes sólo lo son si su contenido de radón es usualmente alto.⁸

Materiales de construcción

Sólo una pequeña fracción de la actividad del ^{222}Rn producida por el decaimiento del ^{226}Ra en las estructuras se difunde y se libera en el aire dentro de los edificios. Esta

fracción depende en mucho del poder de emanación y de la porosidad de los materiales de construcción, así como del coeficiente de difusión del radón en ellos. Por ello, el índice de entrada del ^{222}Rn no puede predecirse con precisión únicamente a partir del contenido de ^{226}Ra en los materiales de construcción⁸, aunque sí puede estimarse a partir de los índices de emanación que se han medido para diferentes materiales de construcción.

De mediciones realizadas en Estados Unidos, Gran Bretaña y la República Federal de Alemania, se ha calculado que el índice de entrada promedio varía entre 2 y 20 $\text{Bq/m}^3\text{h}$ para casas de ladrillo o concreto (que son los materiales más utilizados en latitudes templadas) y es de menos de 1 $\text{Bq/m}^3\text{h}$, para casas de madera.⁸ Mucho mayores valores se esperan cuando los materiales de construcción son ricos en ^{226}Ra y tienen un poder de emanación normal. Ejemplos de estos materiales son el granito, la piedra pómez, el hormigón que contenga lutitas aluminosas y tobas litoides.^{20,25}

Se han investigado técnicas para reducir los índices de entrada de radón debido a la emanación de los materiales de construcción. En Suecia, por ejemplo, la aplicación de papel aluminio en las paredes redujo en un 50% el índice de entrada del radón. También se han utilizado otros selladores que han reducido este índice en un 20-80%, dependiendo del material utilizado. Se ha observado que incluso una capa de pintura ofrece algo de resistencia a la entrada del radón.²⁵

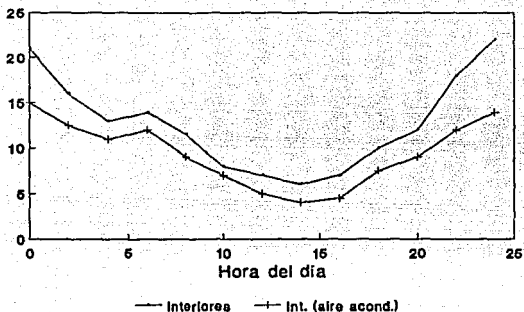


Figura 14. Variación diurna de las concentraciones de ^{222}Rn dentro de los edificios, en Chester, N.J. (promedio 1977-1982). (UNSCEAR, 1988).

Afluencia de radón del suelo

La concentración promedio de ^{222}Rn en el suelo es unas mil veces mayor que la presente en el aire libre al nivel del suelo. Entonces, si existe un transporte importante del suelo al aire dentro de las construcciones, puede dar lugar a concentraciones bastante altas. El índice de entrada depende en mucho de la permeabilidad del suelo y de la estructura de la casa, considerando fisuras y aberturas, así que varía muchísimo de una casa a otra.⁸

El radón puede transportarse del suelo a un edificio ya sea por difusión o por diferencias de presión que pueden resultar de cambios barométricos, de temperatura y velocidad del viento. Comparada con ésta última, la difusión carece de importancia.³ El flujo por diferencia de presión es con frecuencia la fuente predominante de radón en los edificios que

presentan elevadas concentraciones, y es mucho mayor a través de fisuras y agujeros.²⁵

Aire del exterior

El intercambio de aire entre el interior y el exterior introduce algo del radón del exterior al interior. Este intercambio proviene de la ventilación natural a través de ventanas y puertas y de la infiltración por fisuras y/o aberturas en la estructura. Considerando una concentración promedio de 5 Bq/m^3 y un índice de intercambio de aire de 1/hora, el índice de entrada del radón es de $5 \text{ Bq/m}^3 \text{ h}$.²⁵

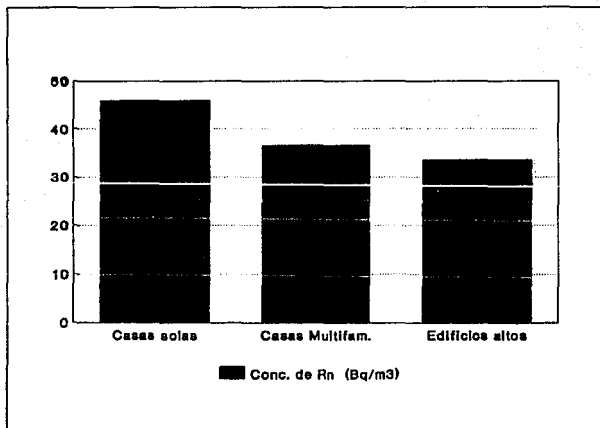


Figura 15. Concentraciones medias de radón en diferentes tipos de construcción. (UNSCEAR, 1988).

Agua

Las concentraciones de radón en el agua son, como regla, menores en aguas superficiales que en aguas profundas.²⁵ El radón puede disolverse en las aguas profundas como resultado del que se libera de rocas y suelo. La cantidad de radón liberado depende del contenido de radio en rocas y suelo, mientras que la cantidad remanente en el agua es función del tiempo que transcurre mientras el agua profunda llega a la superficie.

Si el agua contiene radón, éste puede liberarse durante el uso doméstico del agua, por ejemplo al tomar un baño o al lavar los platos. Calentar y -en particular- hervir el agua en recipientes abiertos, transfiere el radón a la atmósfera, así que cualquier exposición por ingestión resulta del consumo directo de agua y no del de bebidas calientes o del agua que se utiliza para cocinar.¹³

Gas natural

Algunas veces el gas natural se menciona como una fuente potencial significativa de radón dentro de los edificios. El contenido de radón en el gas depende de su fuente y del tiempo que pasa en tránsito y almacenado, y varía comúnmente de niveles no detectables a valores de hasta 54 kBq/m³.¹³

Cuando el gas natural se quema en las casas al cocinar o al utilizarse en la calefacción, el radón que se libera puede incrementar los niveles del interior, sobre todo si el lugar no está ventilado; pero si los productos de combustión se

descargan fuera de la casa, esta fuente carece de importancia.²⁵

Para una supuesta casa de "referencia", el valor medio del índice de entrada del radón, considerando todas las fuentes, es de $50 \text{ Bq/m}^3 \text{ h}$ (tabla 15).

Tabla 15. Índice de entrada de radón de diversas fuentes, para la casa de "referencia".

Fuente	Índice de entrada del radón ($\text{Bq m}^{-3} \text{ h}^{-1}$)	
	Promedio aritmético estimado	Rango común
Suelo		
- Difusión	1.7	
- Diferencias presión	40	0.1-200
Materiales cons.	6.4	1-20
Aire del exterior	5	1-10
Agua	0.1	0.001-100
Gas natural	0.3	0-1
Total (redondeado)	50	2-200

UNSCEAR, 1988.

La concentración de radón en el aire se da en Bq/m^3 . La concentración de una mezcla de descendientes del radón se expresa en términos de la concentración de equilibrio equivalente (CEE) de ^{222}Rn .

El incremento de los descendientes del radón en el aire dentro de los edificios depende del índice de entrada del radón, del índice de ventilación y del índice de deposición de estos descendientes en superficies (suelo, paredes, muebles). La concentración resultante de los descendientes de vida cor-

ta del radón, expresada en términos de la concentración equivalente de equilibrio, está dada por la siguiente relación:

$$F = (\lambda_{eq.Rn}) / \lambda_{Rn}$$

donde:

F = factor de equilibrio entre el radón y sus descendientes

$$\lambda_{eq.Rn} = CEE = 0.105 \lambda_1 + 0.516 \lambda_2 + 0.379 \lambda_3$$

y λ_1, λ_2 , y λ_3 representan las concentraciones de actividad del ^{218}Po , ^{214}Pb y ^{214}Po , respectivamente.

El promedio del valor de F a un metro sobre la superficie terrestre es de 0.8. Combinando el promedio anual de la concentración de radón por año para la población en el aire, al aire libre, de 5 Bq/m^3 con dicho factor de equilibrio, se obtiene la concentración equivalente de equilibrio para el radón y sus descendientes, al aire libre, de 4 Bq/m^3 .

El valor promedio de F en el aire dentro de los edificios es de 0.4, y la concentración promedio de radón en el aire dentro de los edificios, es de 40 Bq/m^3 . Al multiplicar estos valores se obtiene un valor de 16 Bq/m^3 para la concentración equivalente en equilibrio dentro de los edificios.

Las dosis absorbidas anuales que resultan de la inhalación, al aire libre y dentro de los edificios, de los productos de vida corta del radón, se derivan de las concentraciones promedio estimadas y de coeficientes de dosis establecidos, utilizando factores de ocupación de 0.8 y 0.2 para las exposiciones dentro y fuera de los edificios, respectivamente. La dosis equivalente efectiva anual correspondiente es de $1100 \mu\text{Sv}$; la contribución de la exposición al aire libre es

de 70 μSv y la de la exposición dentro de los edificios, de 1000 μSv .²⁵

4.3. Aspectos biológicos

Debido a su falta de reactividad, el radón que se inhala no se une químicamente en los tejidos corporales. Y aunque es soluble en los fluidos corporales y en la grasa, las dosis resultantes son insignificantes en comparación con las que recibe el sistema respiratorio de los productos de su decaimiento.

Al inhalarse, los productos de decaimiento del radón se depositan en el tracto respiratorio. Debido a sus cortas vidas medias radiactivas, la mayoría de los átomos depositados (excepto el ^{212}Pb) decaen en el tracto respiratorio, dando lugar a una dosis de radiación principalmente al epitelio bronquial de las vías respiratorias altas - que es el lugar en donde se presentan la mayoría de los cánceres pulmonares, sean o no inducidos por la radiación -. Puesto que algunos de estos descendientes son emisores α , también se considera la relativamente alta efectividad biológica de esta radiación. El ICRP ha recomendado un factor de calidad de 20 para las partículas α , en comparación con un factor de calidad promedio de uno para la radiación β o γ de estos núclidos hijos.⁸

Debido al incremento en el nivel de los descendientes del radón en el aire dentro de edificios, la dosis equivalente promedio estimada al epitelio bronquial por inhalación

de los descendientes del radón dentro de los edificios, promediado para la población total en latitudes templadas, es aproximadamente diez veces mayor que la dosis equivalente total promedio a otros tejidos corporales procedente de fuentes naturales. Considerando la enorme variación de los niveles de estos descendientes en el aire dentro de edificios, para los individuos que viven en casas en las que la concentración de radón es muy alta, la dosis bronquial puede alcanzar niveles considerablemente mayores.⁸

Tabla 16. Dosis equivalentes anuales para tejido pulmonar debidas a la inhalación de radionúclidos

Radionúclidos	Concentración asumida en aire	Dosis equivalente anual promedio (μSv) a)	
		Pulmón	Epitelio bronquial
^{238}U - ^{226}Ra	700 nBq/m ³		0.1
^{222}Rn	40 Bq/m ³	200	
^{218}Po - ^{214}Po	8×10^{-8} J/m ³ b)		24000
^{210}Po	70 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$		8
^{232}Th - ^{224}Ra	400 nBq/m ³		0.2
^{220}Rn	200 mBq/m ³	0.1	
^{212}Pb - ^{212}Po	70 mBq/m ³		400

a) $1\mu\text{Sv} = 0.1 \text{ mrem}$

b) $1 \text{ J}/\text{m}^3 = 0.5 \times 10^5 \text{ WL}$

NCRP No. 93, 1987.

Entre diversos grupos de mineros que están expuestos al radón durante su trabajo, se ha observado un incremento en la frecuencia de cáncer bronquial. En particular, los estudios epidemiológicos entre quienes trabajan en minas de uranio han mostrado una clara correlación entre la exposición y un in-

cremento en la frecuencia de cáncer pulmonar, que no puede explicarse por otras influencias. Este hallazgo se ha confirmado en estudios realizados con animales.⁸

Por el momento no pueden hacerse estimaciones del riesgo de cáncer pulmonar dentro de las casas a partir de los estudios de la exposición al radón dentro de las minas; pero sí pueden hacerse extrapolaciones si se toman en cuenta ciertas suposiciones, como la validez de los modelos desarrollados para los mineros en la población en general, la validez del modelo del riesgo relativo cuando las exposiciones ocurren durante la infancia y/o para exposiciones permanentes, y la suposición de que los efectos provocados por el radón y por el tabaquismo son multiplicativos, de manera que el modelo de riesgo puede aplicarse por separado a fumadores y no fumadores, entre otros.¹¹

Utilizando un modelo de riesgo derivado de cuatro extensos estudios de análisis de riesgo de cáncer entre mineros expuestos al radón, Lubin y cols. estiman que entre 4900 y 17000 muertes anuales por cáncer pulmonar en Estados Unidos pueden deberse a la exposición al radón dentro de las casas, aunque ratifican que los modelos desarrollados para los mineros no han sido validados para la población expuesta al radón dentro de las construcciones.¹¹

Aunque para los individuos ocupacionalmente expuestos se aplica un límite de exposición de 4 WLM/año,* no se ha establecido ningún estándar para la población en general. Para

* Una unidad que se ha utilizado en las minas para describir la actividad de los productos de decaimiento del radón en el

las exposiciones a la radiactividad creada por el hombre (así como para muchos contaminantes no radiactivos) los límites para el público en general son una décima parte de los valores establecidos para los trabajadores. Para los descendientes del radón sería muy difícil establecer un límite pues las encuestas han mostrado que en algunas casas las concentraciones dan lugar a una exposición de más de 0.4 WLM/ año, y por la enorme variabilidad que existe dependiendo del lugar y del tiempo.¹⁸

En suma, aunque no existen suficientes datos epidemiológicos para cuantificar el riesgo posible de cáncer bronquial asociado a la exposición natural causada por la inhalación de los descendientes del radón, sí se sabe que provocan cáncer bronquial, por lo cual es razonable suponer que las exposiciones en las casas contribuyen con una parte de los casos que se presentan. Por ello es necesario realizar extensos estudios para entender la magnitud y variabilidad de esta exposición y para identificar a las personas o poblaciones que están expuestas a concentraciones excesivas de ellos.

aire, en términos de la energía α potencial es el WL (working level); se define como cualquier combinación de los descendientes de vida corta del radón, por litro de aire, que resulta en la emisión de 1.3×10^5 MeV de energía α . Una concentración de actividad de 100 pCi/litro de ^{222}Rn , en equilibrio con sus descendientes, corresponde a una concentración de energía α potencial de 1 WL. La unidad WLM (working level month) significa una exposición durante las 170 horas de trabajo al mes, a una concentración de radón de 1 WL. Para la población en general el promedio del factor de conversión de dosis es de 0.7 rad/WLM.

Tabla 17. Exposición anual promedio estimada para los descendientes del radón, para los valores de referencia dados para la concentración promedio en aire, al aire libre y dentro de edificios

Contribución por residencia	Concentración de equilibrio equivalente promedio (Bq/m ³)	Exposición anual *		
		Exposición de equilibrio equivalente (1000 Bq h/m ³)	Exposición potencial a la energía (mJ h/m ³) (WLM)	
Descendientes del ²²²Rn (²¹⁸Po -> ²¹⁴Po)				
Dentro de edificios				
En casa	15	90	0.51	0.14
Otros sitios	15	23	0.13	0.036
Al aire libre	4	4	0.022	0.0064
Total		120	0.66	0.19
Descendientes del ²²⁰Rn (²¹²Pb -> ²¹²Po)				
Dentro de edificios				
En casa	0.5	3.0	0.23	0.065
Otros sitios	0.5	0.75	0.057	0.016
Al aire libre	0.2	0.2	0.015	0.0043
Total		4.0	0.30	0.09

* Factores de conversión:

$$1 \text{ Bq h/m}^3 (\text{eq. Rn}) = 0.00562 \mu\text{J h/m}^3 = 1.60 \times 10^{-6} \text{ WLM}$$

$$1 \text{ Bq h/m}^3 (\text{eq. Tn}) = 0.0758 \mu\text{J h/m}^3 = 2.16 \times 10^{-5} \text{ WLM}$$

ICRP No. 50, 1987.

Conclusiones

De las diversas contribuciones de las fuentes naturales de radiación a la dosis equivalente efectiva, la más importante es la inhalación de los productos de decaimiento de vida corta del radón, con una dosis equivalente efectiva anual promedio de 1100 μSv . La segunda fuente por orden de importancia es la irradiación externa, que contribuye aproximadamente con 800 μSv , dividida casi en partes iguales entre la radiación cósmica y las fuentes terrestres. Menos importantes son la ingestión del ^{40}K (180 μSv) y la inhalación de los productos de decaimiento del thorón (160 μSv). Los demás radionúclidos naturales contribuyen poco a la dosis equivalente efectiva anual total, que se estima en 2400 μSv .

La variabilidad de la dosis promedio por las fuentes naturales de radiación está dominada por el componente de radón, pues las concentraciones del radón dentro de los edificios varían hasta en cuatro órdenes de magnitud.

Sería interesante obtener valores de estos contribuyentes naturales en nuestro país, al menos en la Ciudad de México, donde podría aprovecharse que en una zona relativamente pequeña se encuentra gran parte de la población potencialmente afectada.

Si es claro que la exposición a altas concentraciones de radón se correlaciona con una mayor frecuencia de cáncer pulmonar, y conociendo -si no todos- muchos de los factores involucrados, podría hacerse una estimación de las dosis que recibe la población mexicana. O hasta evaluar, según la incidencia de cáncer pulmonar en nuestro país, si es que vale la

pena (desde un punto de vista económico) realizar encuestas a gran escala para calcular los niveles promedio de radón dentro de las casas, considerando los materiales de construcción que más se utilizan aquí, el tipo de viviendas en que habita la mayoría de la gente, nuestras condiciones de vida (todo lo cual difiere en mucho de lo que se encuentra en los países en los que se han realizado la mayoría de los estudios) etc.; esto, además de constituir una contribución importante para la investigación, tal vez fuera un excelente punto de partida para que en otros países del tercer mundo se realizaran estudios al respecto.

Es necesario hacer hincapie en que las concentraciones de radón dentro de las construcciones son relativamente controlables y para los países en los que sí hay presupuestos para realizar extensos estudios y mediciones, existe la posibilidad real de reducir los casos de cáncer pulmonar.

Posiblemente en un futuro no muy lejano exista un límite en cuanto a las concentraciones de radón en agua, materiales de construcción, gas y los demás factores que se sabe más contribuyen a la exposición -sobre todo dentro de las viviendas- e incluso se controlen las zonas que pueden o no urbanizarse.

Independientemente de que apoyemos la seguridad de las plantas nucleares -que no es cuestionable- creo que sería muy productivo encaminar nuestros esfuerzos a limitar las fuentes naturales de radiación, que en nada nos benefician y que constituyen una gran parte de la dosis de radiación que recibimos.

Bibliografía

1. Cohen, Bernard L. "Variation of Radon in U.S. homes correlated with house characteristics, location and socioeconomic factors". Health Physics 60/5. Págs. 631-642. (1991).
2. Choppin, G. y Rydberg, J. NUCLEAR CHEMISTRY. THEORY AND APPLICATIONS. Pergamon Press. Nueva York. (1980).
3. Eisenbud, M. ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY. Academic Press. Tercera edición. Nueva York. (1987).
4. Friedlander, G., Kennedy, J. W., Macias, E.S. y Miller, J.M. NUCLEAR AND RADIOCHEMISTRY. John Wiley & Sons. Tercera edición. Nueva York. (1981).
5. Gessel, Thomas, F. "Background atmospheric ^{222}Rn concentrations outdoors and indoors: a review". Health Physics 45/2. Págs. 289-302. (1983).
6. Hall, Eric, J. RADIATION AND LIFE. Pergamon Press. Segunda edición. Nueva York. (1984).
7. Hanson, G.P. y Komarov, E. "Health effects in residents of high background radiation regions", en IAEA Proceedings of a Symposium. Viena (1983).
8. International Commission on Radiological Protection. Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters. A report of a task group of the ICRP. Reporte No.50. Pergamon Press. Nueva York. (1987).
9. International Commission on Radiological Protection. Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation. Reporte No. 39. Pergamon Press. Nueva York. (1984).
10. Kathren, Ronald, L. RADIOACTIVITY IN THE ENVIRONMENT. SOURCES, DISTRIBUTION AND SURVEILLANCE. Harwood Academic Publishers. Nueva York. (1984).
11. Lubin, Jay, J. "Estimating Rn-induced lung cancer in the United States". Health Physics 57/3. Págs. 417-427. (1989).

12. Mettler, Fred, A. y Sinclair, Warren K. "The 1986 and 1988 UNSCEAR Reports: findings and implications". Health Physics 58/3. Págs. 241-250. (1990).
13. National Council on Radiation Protection. Exposures from the uranium series with emphasis on radon and its daughters. NCRP Reporte No. 77. Bethesda. (1984).
14. National Council on Radiation Protection. Ionizing radiation exposure of the population of the United States. NCRP Reporte No. 93. Bethesda. (1987).
15. National Council on Radiation Protection. Tritium in the environment. NCRP Reporte No. 62. Bethesda. (1983).
16. National Council on Radiation Protection. Evaluation of occupational and environmental exposures to radon and radon daughters in the U.S. NCRP Reporte No. 78. Washington. (1984).
17. National Council on Radiation Protection. Radionuclides in the Earth. NCRP Reporte No. 45. Washington. (1987).
18. Nero, A.V. "Indoor radiation Exposures from ^{222}Rn and its daughters: a review of the issue". Health Physics 45/2. Págs. 277-288. (1983).
19. O'Brien, K. y Laughlin, J. "The radiation dose to man from galactic cosmic rays". Health Physics vol. 22. Págs. 225-232. (1972).
20. OIEA. LA ENERGIA NUCLEOELECTRICA, EL MEDIO AMBIENTE Y EL HOMBRE. Viena. (1984).
21. Spinks, J.W.T. y Wood, R. J. AN INTRODUCTION TO RADIATION CHEMISTRY. John Wiley & Sons. Nueva York. (1984).
22. Turner, James E. ATOMS, RADIATION AND RADIATION PROTECTION. Pergamon Press. Nueva York. (1986).
23. United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. Anexo A. Nueva York. (1977).

24. United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation. Ionizing Radiation: sources and biological effects. Anexo B: Exposiciones a la radiación de fuentes naturales. Nueva York. (1982).
25. United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. Anexo A: Exposures from natural sources of radiation. Nueva York. (1988).
26. Vertes, A. y Kiss, I. NUCLEAR CHEMISTRY. Elsevier Publishing. Amsterdam. (1987).