

Sm 142 72 m K β^- 1,03 α 2	Sm 145 340 d K 0,66 kein β^- γ 0,62, 0,70, 0,48, ... α 2,55	Sm 146 5-10 ⁷ a α 2,55	Sm 147 14,97 1,2-10 ¹¹ a α 2,23 α 87	Sm 148 11,24 α 40000	Sm 149 13,83 α 40000	Sm 150 7,44 α 40000	Sm 151 ~ 93 a β^- 0,076 γ 0,02 α 12400	Sm 152 26,72 α 140	Sm 153 47 h β^- 0,70, 0,64, 0,80, ... γ 0,10, 0,07, ... α 5,5	Sm 22			
Pm 141 ~ 20 m β^- ~ 2,6 γ	Pm 142 34 s β^- 3,78, ... γ	Pm 143 265 d K β^- 0,74	Pm 144 ~ 400 d K kein β^- γ 0,62, 0,70, 0,48, ... α 2,55	Pm 145 18 a K 0,14 γ 0,072, 0,067	Pm 146 710 d K β^- 0,78 γ 0,75, 0,45 α 2 ~ 60	Pm 147 2,65 a β^- 0,23, ... γ ~ 60	Pm 148 42 d 5,3 d β^- 0,13 γ 0,55 α 0,33, 0,77, ... α 148	Pm 149 53 h β^- 1,05, 0,78, ... γ 0,29, ...	Pm 150 2,7 h β^- 2,3, 3,16, ... γ 0,33, ...	Pm 151 28,4 h β^- 1,1 γ 0,34, 0,17, ...	Pm 152 6 m β^- 2,2 γ 0,12, 0,24, ... α 1	Pm 22	
Nd 140 3,3 d K β^- 0,11-0,5	Nd 141 64 s 2,5 h K β^- 0,78 γ 0,04, 0,42, 1,14, ... kein β^- α 1,14	Nd 142 27,11 α 18	Nd 143 12,17 α 240	Nd 144 23,85 2,4-10 ¹⁵ a α 1,83 α 50	Nd 145 8,30 α 60	Nd 146 17,22 α 1,8	Nd 147 11,1 d β^- 0,81, 0,37, ... γ 0,09, 0,53, ... α 147	Nd 148 5,73 α 3,7	Nd 149 1,8 h β^- 1,1, 1,5, 0,95 γ 0,03, 0,65	Nd 150 5,62 α 1,5	Nd 151 12 m β^- 2,06, 1,19, 1,82, 1,65, ... γ 0,09, 2,17, ... α 1	Nd 22	
Pr 139 4,5 h K β^- 1,0 γ 1,3, 1,6, ...	Pr 140 3,4 m K β^- 2,37, ... γ 1,60, 0,90, ...	Pr 141 100 α 10,8	Pr 142 19,1 h β^- 2,15, 0,58 γ 1,57 α 18	Pr 143 13,7 d β^- 0,93 kein β^- α 89	Pr 144 17,3 m β^- 2,98, 2,29, ... γ 0,69, ...	Pr 145 5,9 h β^- 1,80, ... γ 0,07, 1,15	Pr 146 25 m β^- 3,7, 2,3 γ 0,46, 1,49, 0,75	Pr 147 12 m β^- ~ 0,32-1,7	Pr 148 2 m β^- ~ 0,30	Pr 149	Pr 150	Pr 22	
Ce 138 9,2 ms 0,250 Jy 0,30 0,80 1,04 α 0,007 0,6	Ce 139 60 s 140 d Jy 0,75 K 0,10 kein β^- α 0,17	Ce 140 88,48 α 0,31	Ce 141 32,5 d β^- 0,44, 0,58 γ 0,15	Ce 142 11,07 α 0,94	Ce 143 33,4 h β^- 1,09, 1,38, 0,50, ... γ 0,06, 0,29, 0,67, ... α 6,0	Ce 144 284 d β^- 0,32, 0,19, 0,24 γ 0,13, 0,08	Ce 145 3,0 m β^- 2,0, ... γ ...	Ce 146 14 m β^- 0,70 γ 0,32, 0,22, 0,14, ...	Ce 147 1,2 m β^-	Ce 148 0,7 m β^-	Ce 22		
La 137 6-10 ⁴ a K kein γ	La 138 0,089 1,1-10 ¹¹ a K kein β^- γ 1,43, 0,81	La 139 99,911 α 8,2	La 140 40,2 h β^- 1,38, 1,10, 0,83, ... γ 1,60, 0,49, 0,32, 0,82, ...	La 141 3,9 h β^- 2,43, 0,91 γ 1,37	La 142 92 m β^- ~ 4,0, ... γ 0,63, 2,40, 0,90, 2,08, ...	La 143 14,0 m β^- 3,30, ... γ 0,63, 1,17, 0,80, 1,98, ...	La 144 kurz β^-	07.65.02					La 22
Ba 136 7,81 α 0,016 + ?	Ba 137 2,6 m 11,32 Jy 0,66 α 5,1	Ba 138 71,66 α 0,5	Ba 139 85 m β^- 2,30, 2,14, 1,40, ... γ 0,17, 0,78, ... α 4	Ba 140 12,8 d β^- 1,01, 0,48, 0,6, 0,9 γ 0,54, 0,03, 0,44, 0,16, ...	Ba 141 18 m β^- 2,8, ... γ 0,19, 0,29, 0,46, ...	Ba 142 11 m β^- ~ 4 γ 0,26, 0,89, 1,20, ...	Ba 143 13 s β^-	Ba 144 kurz β^-	Ba 145	Ba 146	Ba 147	Ba 22	
Cs 135 2,0-10 ⁶ a β^- 0,21 kein γ α 8,7	Cs 136 13 d β^- 0,34, 0,66 γ 0,83, 1,07, 0,34, ...	Cs 137 30 a β^- 0,51, 1,18 α ~ 2	Cs 138 32 m β^- 3,40, ... γ 1,43, 1,01, 0,46, 2,21, ...	Cs 139 9,5 m β^- 4,3, ... γ	Cs 140 66 s β^- ~ 0,59	Cs 141 kurz β^-	Cs 142 ~ 1 m β^-	Cs 143 kurz β^-	Cs 144 kurz β^-	Cs 145	Cs 146	Cs 22	
Xe 134 10,44 α ~ 0,2	Xe 135 15,7 m 9,2 h Jy 0,53 β^- 0,91, ... γ 0,25, ... α 2,7-10 ⁶	Xe 136 8,87 α 0,15	Xe 137 3,9 m β^- 3,5 γ 0,27, 0,45	Xe 138 17 m β^- 2,4 γ 0,42, 0,51, 1,78, 2,0	Xe 139 41 s β^- ~ 0,90-0,52	Xe 140 16 s β^-	Xe 141 1,7 s β^-	Xe 142 ~ 1,5 s β^-	Xe 143 1 s β^-	Xe 144 ~ 1 s β^-	Xe 22		
I 133 21 h β^- 1,23, 0,59 γ 0,53, 0,87, ...	I 134 53 m β^- 2,41, 1,25, 1,49, ... γ 0,85, 0,89, 0,61, 1,07, ...	I 135 6,7 h β^- 1,0, 0,47, 1,4 γ 1,14, 1,28, 1,72, ...	I 136 83 s β^- 4,2, 7,0, 5,6, 2,7 γ 1,32, 0,40, 0,27, ...	I 137 24 s β^- n	I 138 6 s β^- n	I 139 2,7 s β^- n	I 140	I 141	I 142	I 143	I 144	I 22	
Te 132 78 h β^- 0,22, ... γ 0,05, 0,23 α	Te 133 50 m ~ 2 m β^- 1,3, 2,4 γ 0,75, ... α 0,43, ... γ 0,33	Te 134 42 m β^- ~ 2,4 γ 0,20, 0,26, 0,17, ...	Te 135	Te 136	Te 137	Te 138	Te 139	Te 140	Te 141	Te 142	Te 143	Te 22	
Sb 131 23 m β^-	Sb 132 2,1 m β^-	Sb 133 4,1 m β^-	Sb 134 0,8 m β^-	Sb 135	Sb 136	Sb 137	Sb 138	Sb 139	Sb 140	Sb 141	Sb 142	Sb 22	

C.N.E.A. Biblioteca
ARCHIVO PUBLICACIONES
1 1965

07.65.02



Manual del Curso de Metodología y Aplicación de Radioisótopos

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

BUENOS AIRES — REPUBLICA ARGENTINA

1.0.0 DOSIMETRIA DE RADIACIONES IONIZANTES

1.1.0 DEFINICIONES

La radiodosimetría estudia la determinación de la energía absorbida en un medio expuesto a radiación ionizante.

a) Se denomina dosis absorbida (D) de cualquier radiación a la energía absorbida en la materia por unidad de masa de la misma en el punto de interés. La unidad de dosis es el rad que equivale a 100 ergios/gramo.

b) Se denomina dosis integral a la energía total absorbida en un medio expuesto a radiación ionizante. La unidad de dosis integral es el gramorad, que equivale a 100 ergios.

c) Se denomina dosis en la unidad de tiempo ($\dot{D}$) a la energía absorbida por la unidad de masa en la unidad de tiempo. Puede expresarse en rad/seg., rad/min, etc.

d) Se denomina exposición de radiación x o gamma (X) en un cierto punto a una medida de la radiación que se basa en la capacidad ionizante de ésta. La unidad de exposición es el roentgen (r). La exposición es de un roentgen cuando la ionización producida por electrones secundarios en 1,293 miligramos de aire seco, (1 cm³ en condiciones normales de temperatura y presión) rodeado de aire en el punto en cuestión, es igual a la unidad electrostática de carga de cada signo.

e) Se denomina transferencia lineal de energía a la cantidad lineal de pérdida de energía por unidad de longitud, absorbida localmente, de una partícula ionizante que atraviesa un medio material. La transferencia lineal de energía puede ser expresada en Kev/ μ .

f) Se denomina intensidad de radiación o densidad de flujo de energía radiante (I), en un lugar determinado, a la energía por unidad de tiempo que entra en una pequeña esfera con centro en tal lugar y cuya sección transversal tiene una superficie igual a la unidad. Para un punto de un haz de radiación de dirección definida, el valor de I puede considerarse como la energía que pasa en la unidad de tiempo por la unidad de superficie normal a la radiación en dicho punto. Las unidades de intensidad de radiación más usuales son: erg/(cm² . seg); Mev/(cm² . seg) etc.

g) la cuantificación de un efecto puede estar relacionada con varios parámetros del haz de radiación ionizante que lo provoca. Dentro de ciertos límites se puede admitir que la magnitud del efecto es proporcional a la magnitud de la dosis recibida. Otro parámetro importante es la distribución especial de la energía y está relacionado con la calidad de la radiación mediante la transferencia lineal de energía

de la misma. Por ello, es necesario definir la Eficiencia Relativa de la radiación como la relación entre la dosis necesaria de una radiación patrón y la dosis de la radiación en cuestión para obtener el mismo efecto.

$$E.R = \frac{\text{Dosis de radiación patrón}}{\text{Dosis de radiación } i} \quad \text{para el mismo efecto.}$$

Se toma como patrón una radiación x ó gamma que tiene en el agua una transferencia lineal de energía de 3 Kev/ μ suministrada a 10 rad/min.

Dada la existencia de diferentes eficiencias relativas de la radiación para producir un determinado efecto biológico, se define una unidad, el rem, que permita la comparación. Se dice que en un punto se recibe una dosis de 1 rem cuando se obtiene el mismo efecto que se obtendría con 1 rad de radiación patrón de las características antes consignadas. Por lo tanto, para obtener la dosis expresada en rem, bastará multiplicar la dosis dada en rad por la Eficiencia Relativa

$$\text{Dosis (rem)} = \text{Dosis (rad)} \times E.R$$

El concepto de Eficiencia Relativa tiene una utilidad limitada, especialmente en el campo biológico, porque la eficacia de una radiación depende de muchos factores subsidiarios, como por ejemplo la intensidad de la dosis, su fraccionamiento, el pH, la presión de oxígeno, la temperatura, etc.

1.2.0 TRANSFERENCIA DE ENERGIA DE UN HAZ DE RADIACIONES AL MEDIO IRRADIADO

La transferencia de energía de un fotón a un medio con el cual interacciona se realiza mediante dos procesos: en el primero, a través de alguno de los tres efectos de interacción conocidos (fotoeléctrico, Compton o formación de pares) el fotón entrega parte o toda su energía a un electrón del medio o al par positrón-electrón en que se materializa, bajo forma de energía cinética.

En este proceso, la probabilidad de transferencia de energía por unidad de recorrido del fotón al medio está dada por el coeficiente de absorción μ_a .

En el segundo proceso, la energía cinética del electrón o positrón se transfiere al medio en el que se mueven, fundamentalmente por colisión con los electrones del medio. La energía transferida por colisión se traduce en ionización y excitación de los electrones.

Cuando el medio absorbente es el aire, se verifica que en promedio se produce un par de iones por cada 33,7 eV de energía transferida por colisión.

1.3.0 DOSIMETRIA DE FUENTES EXTERNAS

1.3.1 Variación de la intensidad de un haz al atravesar un medio absorbente

Sea un haz de N fotones colimados que en la unidad de tiempo inciden sobre una superficie ΔS . Después de atravesar un pequeño espesor de absorbente Δx , se verifica que una parte del haz (ΔN) es eliminado del mismo. El espesor Δx debe ser tal que ΔN resulte despreciable con respecto a N.

Aplicando la definición de coeficiente de atenuación será:

$$\mu = \frac{\Delta N}{N \cdot \Delta x} \quad \text{o sea:} \quad \Delta N = \mu \cdot N \cdot \Delta x \quad (1)$$

Si el haz atraviesa un espesor x, puede deducirse de la (1) el valor del número de fotones (N) que emergen por unidad de tiempo sin haber interactuado con la materia conociendo el número de fotones incidentes en la unidad de tiempo (N_0). Se demuestra que:

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

Esta expresión será también válida para un haz no colimado (pero de pequeña divergencia) si N_0 es el número de fotones que se tendrían en el punto de emergencia si se eliminara el absorbente.

Dividiendo ambos miembros de la última expresión por ΔS y multiplicando por la energía de cada fotón ϵ (supuesto un haz monoenergético), se verifica:

$$\frac{N \cdot \epsilon}{\Delta S} = \frac{N_0 \cdot \epsilon}{\Delta S} e^{-\mu x}$$

Por definición de intensidad resulta:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (2)$$

Esta expresión da solamente el valor de la intensidad de los fotones que no han interactuado, pero en la realidad, esta intensidad se ve incrementada por la energía de fotones secundarios que se reenfojan en el punto en cuestión.

Los valores de μ pueden obtenerse de la figura 1 ó de la tabla 1.

1.3.2 Relación entre dosis en la unidad de tiempo e intensidad

Dividiendo ambos miembros de la expresión (1) por: $\Delta m = \Delta S \cdot \Delta x \cdot \rho$; donde Δm es la masa que atraviesa el haz de fotones en el espesor Δx ; y ρ la densidad del medio resulta:

$$\frac{\Delta N}{\Delta m} = \frac{\mu \cdot N}{\rho \cdot \Delta S}$$

Con esta expresión, se obtiene el número de fotones eliminados del haz por unidad de masa. Si se multiplican ambos miembros por la energía de cada fotón (supuesto un haz monoenergético) será:

$$\frac{\Delta N \cdot \epsilon}{\Delta m} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{N \cdot \epsilon}{\Delta S}$$

De acuerdo con la definición de intensidad queda:

$$\frac{\Delta N \cdot \epsilon}{\Delta m} = \frac{\mu}{\rho} \cdot I$$

Con lo cual se obtiene que la energía que es eliminada de un haz de fotones (parte de la cual será luego absorbida localmente y el resto dispersada) por unidad de masa y por unidad de tiempo es igual al producto del coeficiente másico de atenuación por la intensidad del haz.

Pero, el coeficiente μ puede considerarse como la suma de μ_a (coeficiente de absorción energética) y de μ_s que tiene en cuenta la energía eliminada del haz que no es absorbida localmente, es decir la energía dispersa. O sea: $\mu = \mu_a + \mu_s$

Por lo tanto:

$$\frac{\Delta N \cdot \epsilon}{\Delta m} = \frac{\mu_a}{\rho} \cdot I + \frac{\mu_s}{\rho} \cdot I$$

El primer término del segundo miembro representa entonces la energía cedida (por los fotones a electrones y positrones) por unidad de masa y por unidad de tiempo que es absorbida localmente.

Por otra parte, si se considera un elemento de masa Δm , se observa que algunos electrones y positrones que han recibido energía de los fotones dentro de tal elemento de masa, en su trayectoria pueden salir de él y ceder parte de su energía fuera del mismo.

Si el elemento en cuestión se encuentra en una zona de equilibrio electrónico, * la energía que sale de Δm será igual a la energía que otras partículas cargadas, pues tas en movimiento fuera de Δm , cederán dentro de Δm .

En resumen, en una zona de equilibrio electrónico se verifica que la energía que los fotones ceden a electrones y positrones en un elemento Δm es igual a la energía que electrones y positrones (puestos en movimiento dentro o fuera de Δm) ceden en Δm .

En este caso el término 1. $(\frac{\mu_a}{\rho})$ representa también la energía cedida al medio por partículas cargadas (o sea la energía absorbida por el medio) por unidad de masa y de tiempo. Es decir que ese término es igual a la dosis en la unidad de tiempo en un punto situado en una zona de equilibrio electrónico, o sea:

$$D = 1 \cdot \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right) \quad (3)$$

Los valores de $(\frac{\mu_a}{\rho})$ para aire y para agua pueden obtenerse de la figura 2 ó de la tabla 1.

1.3.3 Cálculo de la intensidad para una fuente puntual

Para una fuente puntual de actividad A que emite un fotón de energía ϵ por desintegración se verifica que a una distancia d de la fuente cuando no hay absorbente interpuesto vale:

$$I = \frac{A \cdot \epsilon}{4 \cdot \pi \cdot d^2}$$

Si hubiera un absorbente de espesor x interpuesto entre la fuente y el punto, sería de acuerdo con (2):

$$I = \frac{A \cdot \epsilon}{4 \cdot \pi \cdot d^2} e^{-\mu x} \quad (4)$$

* En un punto existe equilibrio electrónico cuando la energía de las partículas cargadas que penetran en un pequeño volumen que rodea al punto en cuestión es igual a la energía de las partículas cargadas que salen de ese mismo volumen.

1.3.4 Dosis en la unidad de tiempo para una fuente puntual

De las expresiones (3) y (4) se deduce que la dosis en la unidad de tiempo ($\dot{D}$) en un punto situado en una zona de equilibrio a una distancia $\underline{d}$ de una fuente de actividad A que emite un fotón de energía $\underline{\epsilon}$ por desintegración, cuando existe un absorbente de espesor x entre el punto y la fuente es:

$$\dot{D} = \frac{A \cdot \epsilon}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \frac{\mu_a}{\sigma} e^{-\mu x} \quad (5)$$

En el caso de un emisor gamma de varias energías ($\epsilon_1, \epsilon_2 \dots$) deberá tenerse en cuenta la abundancia por desintegración de cada una de ellas ($p_1, p_2, \dots$) tomándose el coeficiente de atenuación ($\mu_1, \mu_2, \dots$) y el de absorción $(\frac{\mu_a}{\sigma})_1; (\frac{\mu_a}{\sigma})_2 \dots$ correspondiente a cada energía.

La dosis en la unidad de tiempo se obtendrá sumando los valores deducidos de la expresión (5) para cada energía, o sea:

$$\dot{D} = \frac{A \cdot p_1 \cdot \epsilon_1}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \left(\frac{\mu_a}{\sigma}\right)_1 e^{-\mu_1 x} + \frac{A \cdot p_2 \cdot \epsilon_2}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \left(\frac{\mu_a}{\sigma}\right)_2 e^{-\mu_2 x} + \dots$$

Es decir:

$$\dot{D} = \frac{A}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \sum p_i \epsilon_i \left(\frac{\mu_a}{\sigma}\right)_i e^{-\mu_i x}$$

(Esta fórmula no tiene en cuenta la contribución por radiación dispersa).

1.3.5 Exposición producida por una fuente gamma puntual

De acuerdo con la definición de exposición puede deducirse el valor de la energía absorbida localmente que es originada por interacción en la unidad de masa de aire, en un punto en el cual la exposición es de 1 roentgen:

$$\begin{aligned} I_r &= \frac{1 \text{ ues (q)}}{1,29 \cdot 10^{-3} \text{ g}} \longrightarrow \\ \rightarrow \frac{1 p \cdot i}{4,8 \cdot 10^{-10}} \cdot 33,7 \frac{\text{eV}}{\text{pi}} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} \frac{\text{erg}}{\text{eV}} \cdot \frac{1}{1,29 \cdot 10^{-3} \text{ g}} &= 86,9 \frac{\text{erg}}{\text{g}} \quad (6) \end{aligned}$$

ya que la carga de un ion es de $4,8 \cdot 10^{-10}$ ues (q), la energía media entregada al aire para formar un par de iones (p.i.) es de 33,7 eV y un eV equivale a $1,6 \cdot 10^{-12}$ erg.

De acuerdo con lo visto en el punto 3, la energía cedida por unidad de masa y por unidad de tiempo, que es absorbida localmente cuando la intensidad de radiación es I, será para el aire igual al producto:

$$I \cdot \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{aire}}$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta el valor obtenido en (6) si se designa con $\dot{X}$ la exposición en la unidad de tiempo, para un haz de intensidad I, será:

$$\dot{X} = I \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{aire}} \cdot \frac{1 \text{ r}}{86,9 \text{ erg/g}} \quad (7)$$

Para una fuente puntual, la exposición en un punto situado a una distancia $\underline{d}$, cuando no hay absorbente interpuesto resulta:

$$\dot{X} = \frac{A \cdot \epsilon}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{aire}} \frac{1 \text{ r}}{86,9 \frac{\text{erg}}{\text{g}}}$$

De esta expresión puede deducirse que entre dos puntos situados a distancias d_1 y d_2 de una misma fuente, la relación entre las exposiciones es inversamente proporcional al cuadrado de esas distancias, es decir:

$$\frac{\dot{X}_1}{\dot{X}_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

Cuando entre la fuente y el punto se tiene un absorbente de espesor x , si no se considera la radiación dispersa, la exposición es de acuerdo con (2) y (7):

$$\dot{X} = I_0 \cdot \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{aire}} \cdot e^{-\mu x} \frac{1 \text{ r}}{86,9 \text{ erg/g}}$$

Para una fuente puntual de un emisor gamma de varias energías será

$$\dot{X} = \frac{A}{4 \pi d^2} \frac{1 \text{ r}}{86,9 \text{ erg/g}} \cdot \sum p_i \epsilon_i \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{i, \text{aire}} \quad (8)$$

y si existe un absorbente interpuesto:

$$\dot{X} = \frac{A}{4 \pi d^2} \cdot \frac{1 \text{ r}}{86,9 \text{ erg/g}} \sum p_i \cdot \epsilon_i \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{i, \text{aire}} \cdot e^{-\mu_i x}$$

1.3.6 Relación entre dosis y exposición

Resulta de interés poder relacionar la exposición en un punto de un determinado medio, con la dosis en la unidad de tiempo en ese mismo punto. Si se expresa la dosis en la unidad de tiempo en rad sobre unidad de tiempo y la exposición en roentgen sobre unidad de tiempo, de (3) y (7) se tiene:

$$\dot{D} = I \cdot \frac{\mu_a}{\rho_{\text{medio}}} \cdot \frac{1 \text{ rad}}{100 \text{ erg/g}} \quad (\text{cuando existe equilibrio electrónico})$$

$$\dot{X} = I \cdot \frac{\mu_a}{\rho_{\text{aire}}} \cdot \frac{1 \text{ r}}{86,9 \text{ erg/g}}$$

Por lo tanto

$$\frac{\dot{D}}{\dot{X}} = \frac{D}{X} = \frac{\left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{medio}}}{\left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{aire}}} \cdot 0,869 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{r}} = f \cdot \frac{\text{rad}}{\text{r}}$$

La tabla 2 da los valores de f_λ en agua, hueso, y músculo, para energías entre 10 KeV y 3 MeV.

En la misma se observa que para las energías γ emitidas por los radioisótopos más usuales en radioterapia esta relación vale aproximadamente $0,96 \frac{\text{rad}}{\text{r}}$ (para agua y para músculo). O sea que en esos casos se verifica:

$$D = X \cdot 0,96 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{r}} \quad (9)$$

En la figura 3 se encuentran graficados los valores de f_λ para hueso, músculo y grasa.

1.3.7 Cálculo de la constante específica de radiación gamma (Γ)

De acuerdo con la expresión (8) resulta que para un determinado radionucleído, el valor de la exposición depende sólo de la actividad de la fuente y de la distancia de ésta al punto en cuestión. Por lo tanto pueden reunirse todas las constantes en un sólo factor que se denomina constante específica de radiación gamma (Γ) y que vale:

$$\Gamma = \frac{1}{4 \pi} \frac{r}{86,9 \text{ erg/g}} \sum p_i \epsilon_i \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{i, \text{aire}}$$

En la figura 4 puede obtenerse el valor de Γ para radiación monoenergética y cuando se considera un fotón por desintegración.

En el caso de un radionucleído que emite varias energías debe tenerse en cuenta la abundancia por desintegración de cada una de ellas, (p_i) multiplicarla por el valor Γ_i que corresponde a cada energía y hacer la suma de esos productos. Es decir que el valor de Γ se obtendrá mediante la siguiente sumatoria: $\Gamma = \sum p_i \Gamma_i$.

Los valores de Γ (expresados en $\frac{r \text{ m}^2}{h \text{ Ci}}$) para algunos radionucleídos figuran en la tabla 3.

Con los valores de Γ , puede calcularse la exposición de la siguiente forma:

$$\dot{X} = \frac{A \Gamma}{d^2}$$

Cuando se tiene un absorbente de espesor x entre la fuente y el punto y no se considera la contribución por radiación dispersa, la exposición valdrá:

$$\dot{X} = \frac{A \Gamma}{d^2} \cdot e^{-\mu x}$$

si se puede adoptar un único valor para μ .

En caso contrario, debe hacerse el cálculo de la exposición para cada energía por separado y luego sumar.

Cuando se desea calcular la dosis en la unidad de tiempo en tejido acuoso, para los radionucleídos más usuales se verifica recordando la (9) que:

$$\dot{D} = \frac{A \Gamma}{d^2} e^{-\mu x} 0,96 \frac{\text{rad}}{r} \quad (10)$$

(si no se considera la contribución por radiación dispersa, que se reenfoca en el punto en cuestión).

1.3.8 Cálculo de la dosis acumulada durante un cierto tiempo

Sea un emisor gamma de actividad inicial A_0 . A tiempo t se verificará una actividad $A = A_0 e^{-\lambda t}$ por lo tanto la dosis en la unidad de tiempo será de acuerdo con la (10) y para las condiciones establecidas en el párrafo anterior:

$$\dot{D} = A_0 \frac{\Gamma e^{-\lambda t}}{d^2} e^{-\mu x} \cdot 0,96 \frac{\text{rad}}{\text{r}} = \dot{D}_0 e^{-\lambda t}$$

Si se desea conocer la dosis acumulada durante un cierto tiempo t se debe integrar la expresión anterior, de lo que resulta

$$D_{0-t} = \frac{\dot{D}_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

Si el tiempo t es mucho mayor que el periodo de semidesintegración el valor de $e^{-\lambda t}$ tiende a 0 y por lo tanto queda

$$D_{0-\infty} = \frac{\dot{D}_0}{\lambda}$$

Si por el contrario el tiempo t es muy pequeño con respecto al período de semi desintegración, la actividad no habrá variado sensiblemente durante ese tiempo y por lo tanto será

$$D_{0-t} = \dot{D}_0 \cdot t$$

1.4.0 DOSIMETRIA DE FUENTES INTERNAS

Los materiales radiactivos que se incorporan en el organismo se distribuyen de acuerdo a sus propiedades físico-químicas y a la actividad metabólica de los diversos órganos y tejidos; la eliminación depende también de las mismas propiedades. Se denomina órgano crítico al que recibe la mayor dosis total de radiación. (Con esta definición, no siempre el órgano crítico coincide con el órgano que presentará los mayores riesgos de ser lesionados).

1.4.1 Cálculo de dosis por unidad de tiempo

La fracción absorbida de la energía emitida por un radionucleído incorporado en un tejido depende del tipo y energía de la radiación y de la geometría del órgano.

Se puede considerar que en caso de radiación α toda la energía emitida por gramo de tejido, se absorbe por gramo de tejido. La misma aproximación se usará para radiaciones β en las partes centrales de los órganos, donde existe equilibrio entre los electrones que escapan de la zona que los emite y los que entran en ella; el error por sobreestimación puede ser considerable en órganos de muy poco espesor.

En el caso de radiación γ resulta sencillo estimar por integración, la fracción de la energía emitida absorbida por unidad de masa (siempre que la distribución del radioisótopo sea homogénea) en un órgano de geometría simple. La figura 5 da la fracción que se absorbe en el centro de órganos esféricos, en función del radio. Si el radioisótopo se distribuye homogéneamente en todo el organismo y el órgano en cuestión es profundo, podrá considerarse con poco error que toda la energía γ emitida por gramo se absorbe por gramo en dicho órgano.

Con las consideraciones anteriores puede estimarse en cada caso cual es la fracción absorbida de la energía emitida por desintegración.

La dosis en un órgano resulta entonces:

$$\text{Dosis} = \mathcal{E} \cdot f \cdot A \cdot 1,6 \times 10^{-6} \text{ erg/MeV} \times 3,7 \times 10^{10} \frac{\text{des}}{\text{seg} \cdot \text{Curie}} \cdot 0,01 \frac{\text{rad}}{\text{erg/g}}$$

donde

$\mathcal{E}$: es la energía emitida por desintegración.

f : es la fracción de la energía emitida por gramo, que se absorbe por gramo.

A : es la actividad por unidad de masa en el órgano (concentración de la actividad).

La dosis así calculada es la dosis por unidad de tiempo en el instante en el cual existe en el órgano la concentración de actividad en cuestión.

1.4.2 Cálculo de dosis total

Para gran parte de los órganos la eliminación de material depositado es exponencial:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-kt}$$

donde C_t es la cantidad de material a tiempo t ; C_0 la cantidad en el instante inicial, k es una constante (de "eliminación") y t el tiempo transcurrido.

Se define como período biológico al tiempo durante el cual la mitad del material es eliminado ($T_B = \frac{0.693}{k}$)

Si el material está además desintegrando, la actividad residual en el órgano es:

$$A_t = A \cdot e^{-(k + \lambda) t}$$

y la dosis por unidad de tiempo en un instante t resulta:

$$\dot{D}_t = \dot{D}_0 \cdot e^{-(k + \lambda) t}$$

La tabla 4 da los períodos de semidesintegración y biológico para diversos radioisótopos, siendo

$$k + \lambda = 0,693 \cdot \frac{T_{1/2} + T_B}{T_{1/2} \cdot T_B}$$

La dosis recibida por el órgano (desde el momento de introducción del radioisótopo en él, en adelante) se obtiene por integración, resultando:

$$\text{Dosis Total} = \frac{\dot{D}_0}{k + \lambda}$$

BIBLIOGRAFIA

LEA, D.E., Actions of radiations on living cells. Cambridge, University Press, (1955).

HINE, G.J., and BROWNELL, G.L., Radiation dosimetry. New York, Academic Press inc, (1956).

DAVISSON, C., and EVANS, R., γ ray absorption coefficients. Rev. Mod. Phys. 24, 79 (1952).

National Bureau of Standards, Handbook 52 (1953).

JOHNS, H., The physics of radiology.

Dosimetría Clínica (O.I.E.A.).

TABLA 1. COEFICIENTES DE ATENUACION Y ABSORCION

Nucleído	$\mu \text{ (cm}^{-1}\text{)}$					$\frac{\mu_a}{\rho} \text{ (}\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}\text{)}$	
	Agua $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$	Pb $\rho = 11,3 \text{ g/cm}^3$	Fe $\rho = 7,8 \text{ g/cm}^3$	Hormigón $\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$	Al $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$	aire	agua
^{60}Co	0,063	0,67	0,41	0,132	0,148	0,0267	0,0297
^{137}Cs	0,088	1,21	0,56	0,181	0,2	0,0294	0,0327
^{198}Au	0,103	2,37	0,72	0,221	0,248	0,03	0,033
$^{192}\text{Ir}^*$	0,105	2,6	0,76	0,23	0,25	0,03	0,033

* Valores medios aproximados.

TABLA 2 ** VALORES DE f_{λ}

Energía (Mev)	Agua	Hueso Compacto	Músculo
0,010	0,912	3,55	0,925
,015	,889	3,96	,917
,020	,879	4,23	,917
,030	,869	4,39	,911
,040	,879	4,14	,920
,050	,892	3,58	,926
,060	,905	2,91	,929
,080	,932	1,91	,940
,10	,949	1,46	,949
,15	,962	1,05	,956
,20	,973	0,979	,963
,30	,968	,939	,957
,40	,966	,928	,955
,50	,965	,925	,957
,60	,966	,925	,957
,80	,965	,921	,957
1,0	,965	,919	,957
1,5	,964	,921	,957
2,0	,965	,921	,955
3,0	,962	,929	,955

** Dosimetría Clínica (O.I.E.A.)

TABLA 3

<u>Radionucleído</u>	<u>$r \left(\frac{r \cdot m^2}{h \cdot Ci} \right)$</u>
^{24}Na	1,93
^{59}Fe	0,645
^{60}Co	1,34
^{131}I	0,292
^{137}Cs	0,324
^{198}Au	0,236
^{226}Ra	0,97 (sin filtro)
(en equilibrio con sus hijas)	0,845 (con filtración de 0,5 mm de platino)
^{192}Ir	0,48
^{182}Ta	0,68

TABLA 4

Nucleído	T 1/2 (días)	Organo crítico	T _B en órgano crítico (días)
¹⁴ C	2x10 ⁶	grasa hueso	35 180
²⁴ Na	0.62	todo el cuerpo	29
³² P	14.3	hueso	1200
³⁵ S	87,1	piel	22
⁴⁵ Ca	152	hueso	18000
⁵⁹ Fe	46.3	sangre	65
⁶⁰ Co	1.9x10 ³	hígado; bazo	9
⁹⁰ Sr	9.1x10 ³	hueso	3.9x10 ³
¹³¹ I	8	tiroides	180
¹³⁷ Cs	1.2x10 ⁴	músculo	140

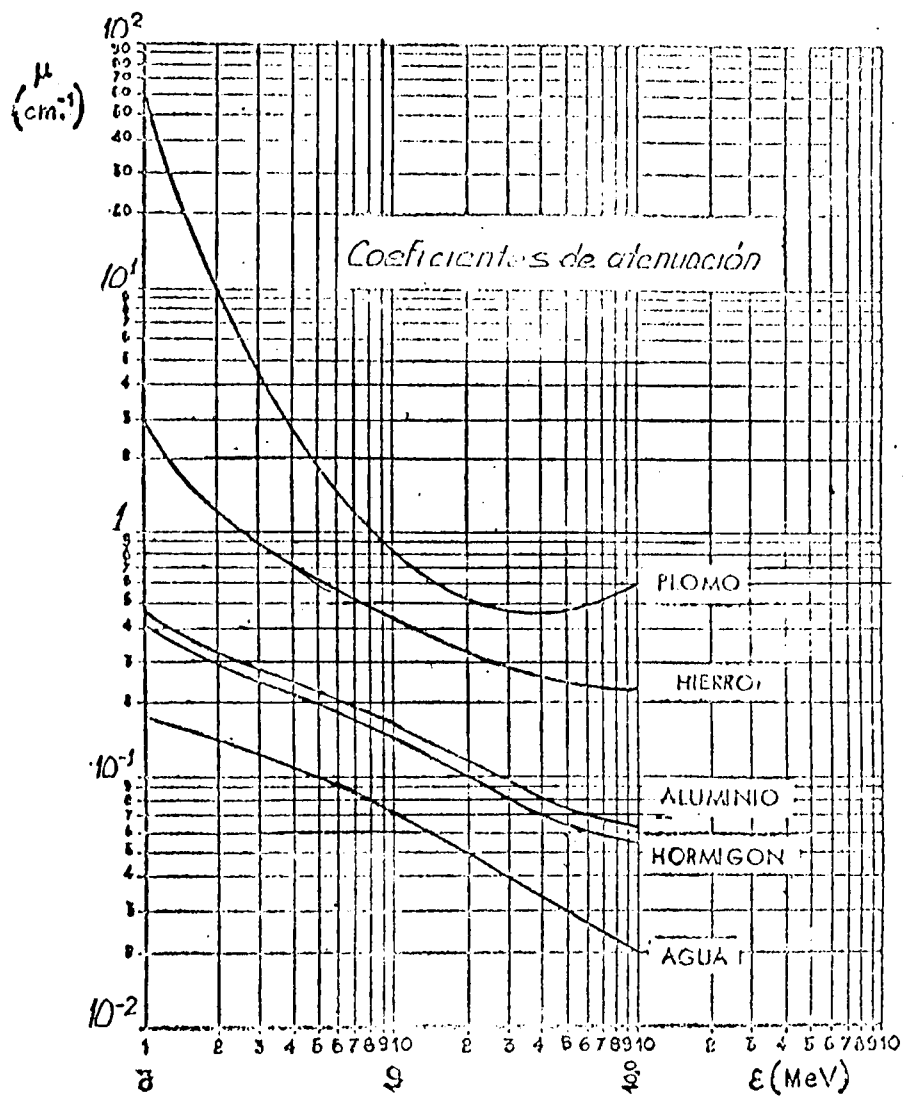


Figura 1

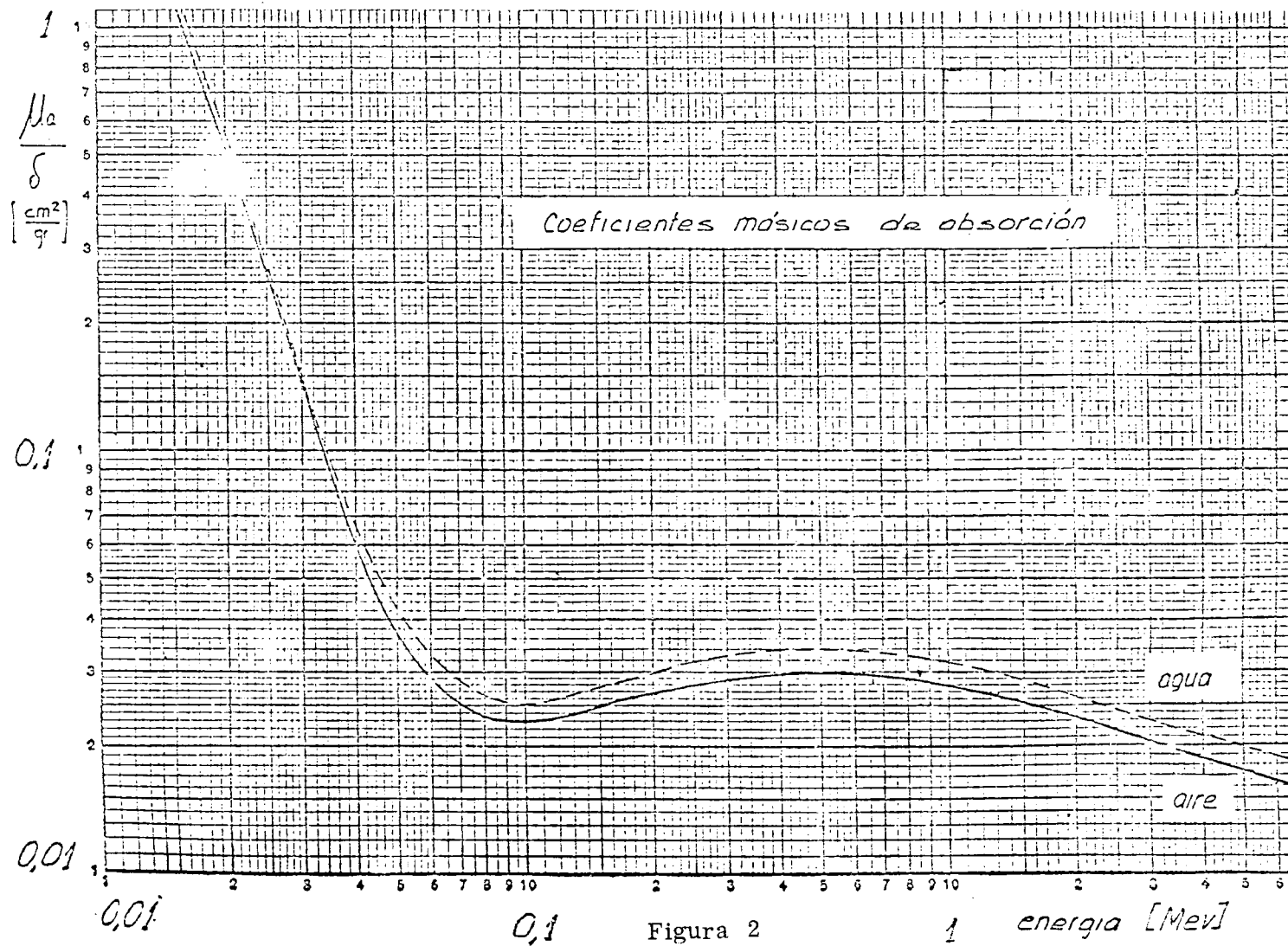


Figura 2

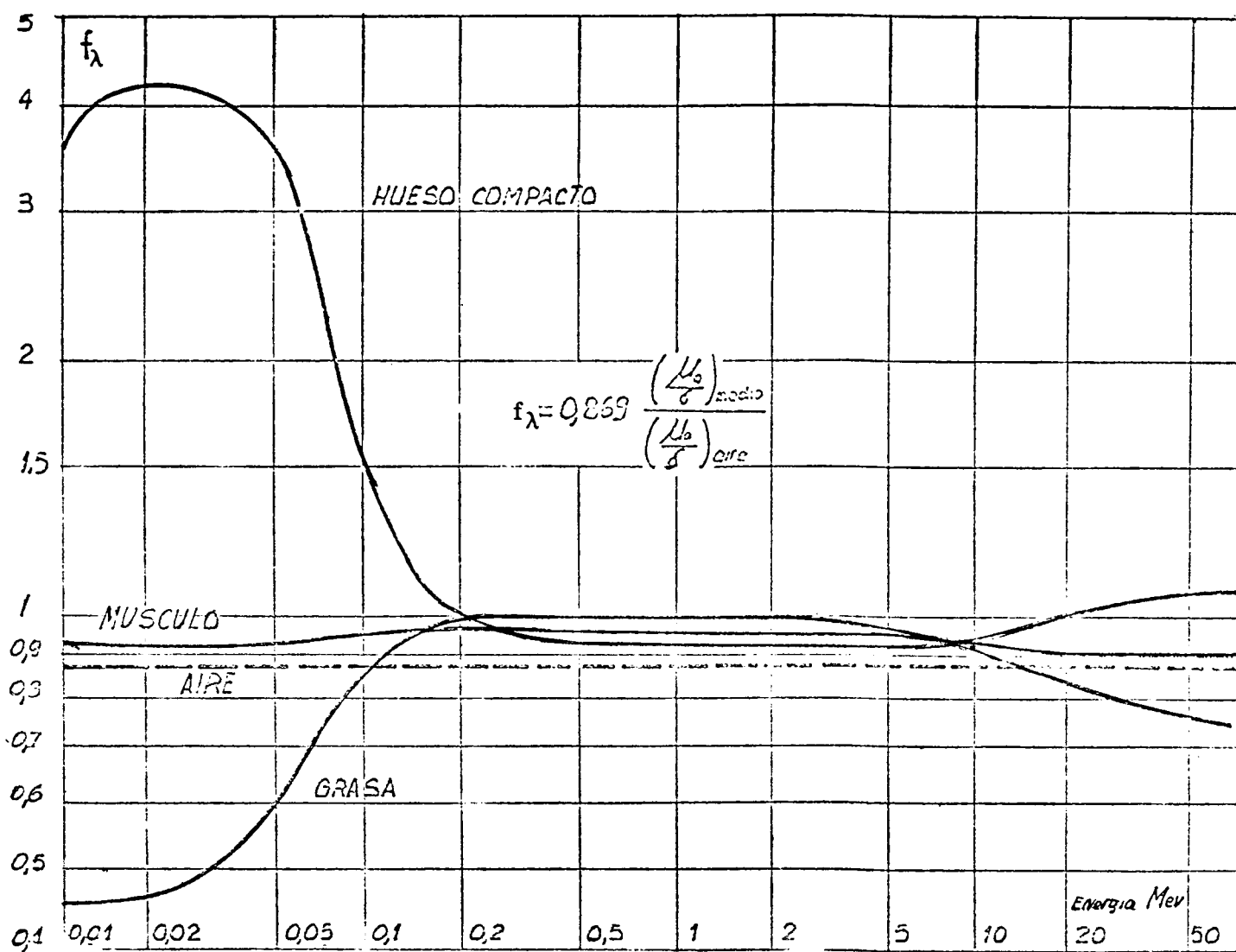


Figura 3

Constante específica de radiación gamma

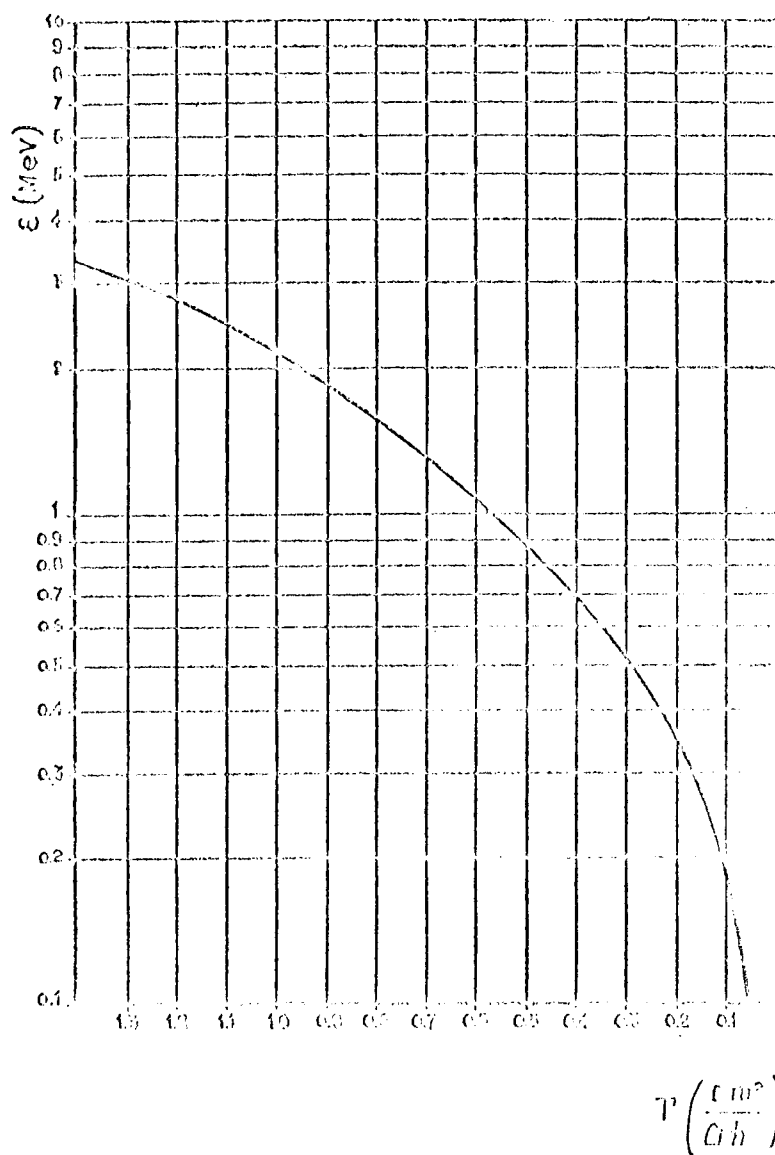


Figura 4

PORCENTAJE DE ENERGIA EMITIDA POR GRAMO, QUE SE ABSORBE
POR GRAMO EN EL CENTRO DEL UTERO.

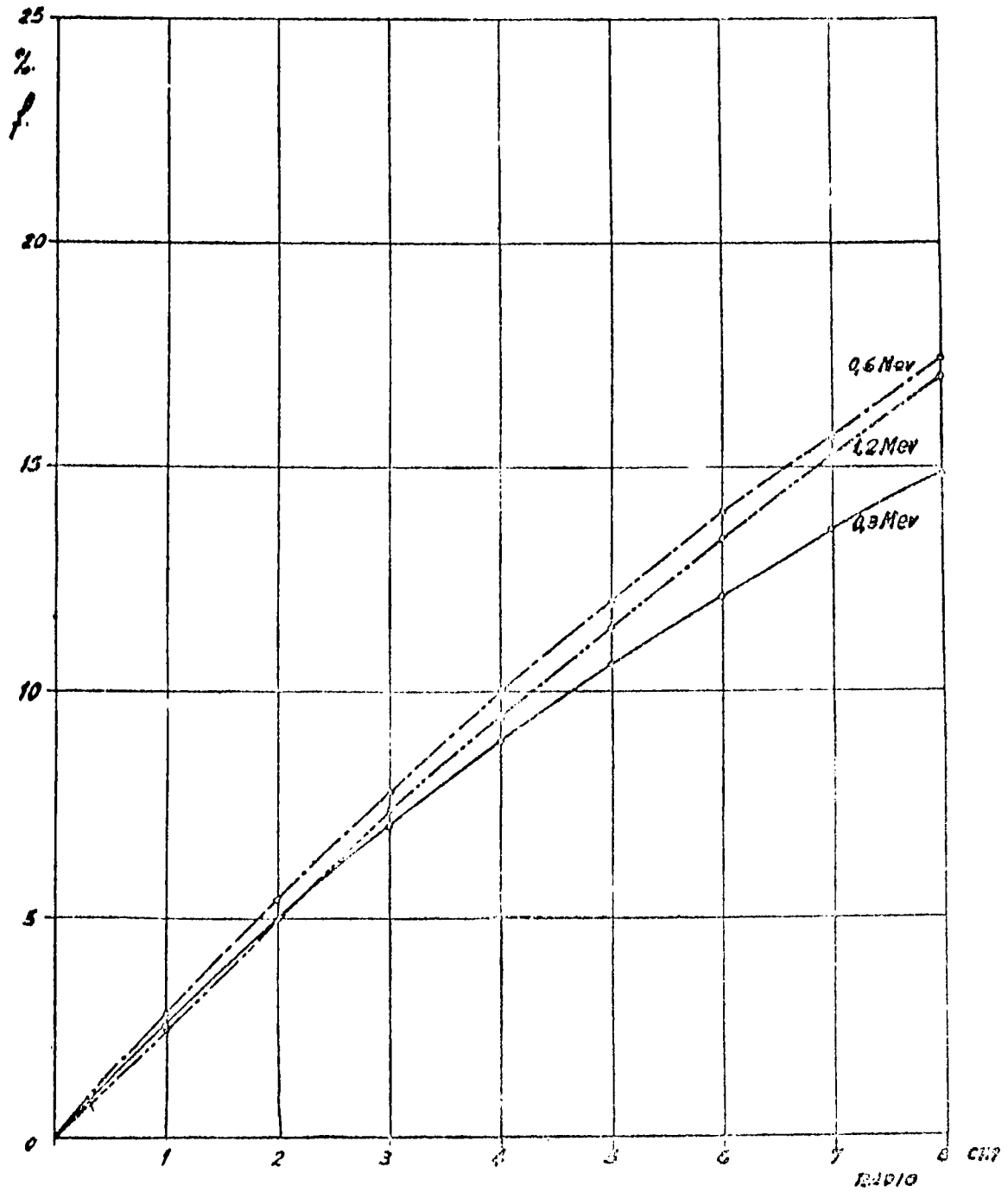


Figura 5

ALCANCES DE PARTICULAS β EN TEJIDO ACUOSO ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$)

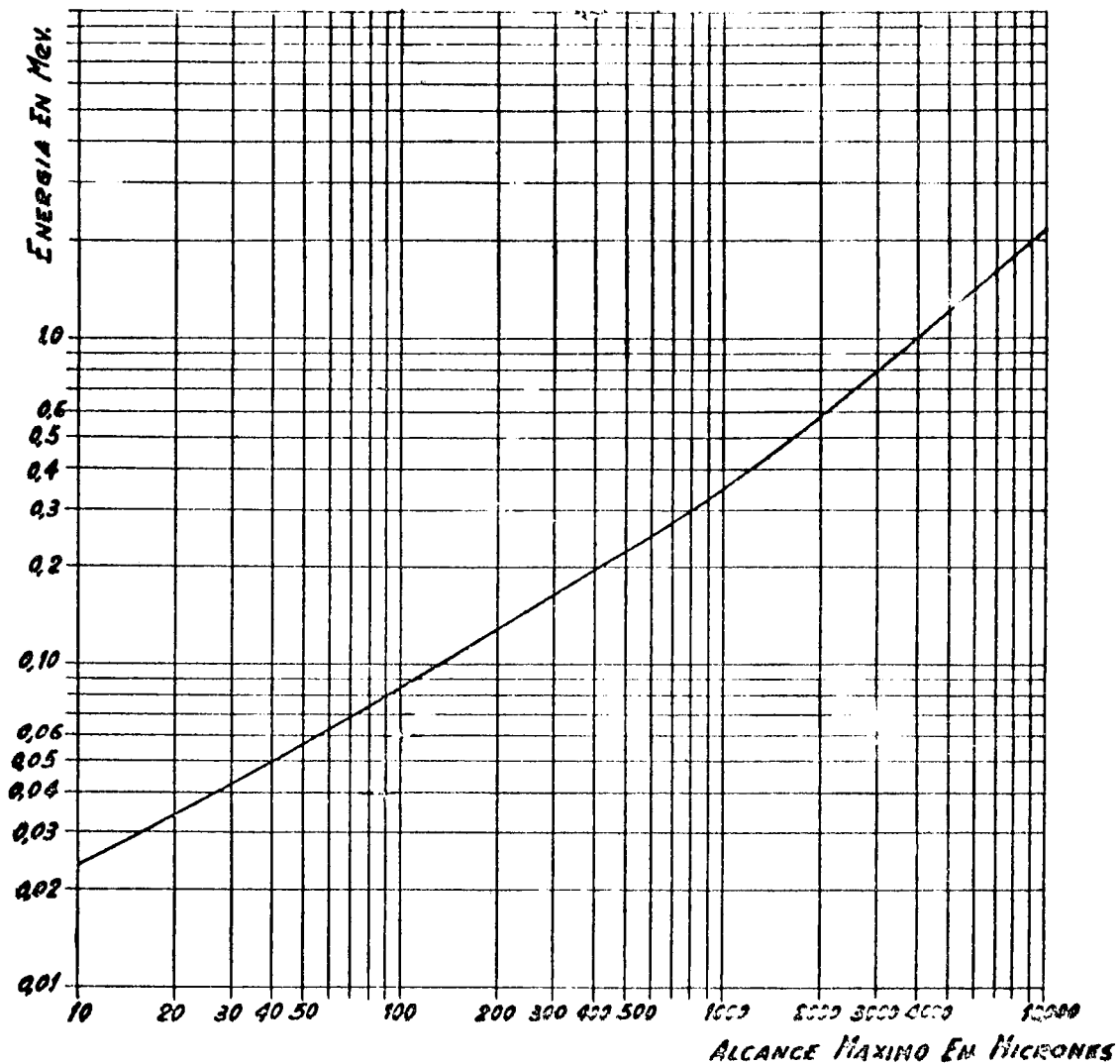


Figura 6