

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO Bib. 1956

REPUBLICA ARGENTINA

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

CURSO DE APLICACION DE RADIOISOTOPOS

RADIODOSIMETRIA

Dan Beninson, Hugo Mugliaroli y Alejandro Placer

R A D I O D O S I M E T R I A *

En todo estudio sobre efectos de la radiación se intenta correlacionar la magnitud del efecto con la magnitud de la irradiación. Como puede aceptarse axiomáticamente que sólo se produce efectos si el objeto irradiado absorbe energía de la radiación, se suele en primera aproximación relacionar el efecto con la energía absorbida.

Dosis de radiación en un punto es la energía transferida por unidad de masa al objeto irradiado en ese punto. La unidad de dosis de radiación en el sistema c.g.s. es el $\frac{\text{erg}}{\text{g}}$; la unidad usual es el rad;

$$1 \text{ rad} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{g}}$$

La dosis promedio absorbida por un objeto es el cociente entre la energía total absorbida y la masa del objeto; en caso de irradiación uniforme de todo el objeto, la dosis promedio es igual a la dosis en cualquiera de los puntos.

La dosis de radiación es uno de los parámetros importantes que determinan la magnitud del efecto de la irradiación; para muchos tipos de efectos, la magnitud de éstos es lineal con la dosis. Otro parámetro de importancia es la transferencia lineal de energía, o sea, la energía absorbida por unidad de recorrido de la radiación en el objeto. De este modo, con diferentes dosis de varios tipos de radiaciones pueden obtenerse los mismos efectos.

Se define como Eficiencia Relativa de una radiación, al cociente entre la dosis de rayos X necesaria para producir un efecto y la dosis de esa radiación necesaria para producir el mismo efecto.

$$ER_i = \frac{\text{Dosis de rayos X}}{\text{Dosis de radiación } i} \left. \vphantom{\frac{\text{Dosis de rayos X}}{\text{Dosis de radiación } i}} \right\} \text{para producir el mismo efecto.}$$

* Este Folleto es una nueva edición con agregados y nuevos gráficos del publicado anteriormente bajo el mismo título.

El coeficiente de Eficiencia Relativa depende esencialmente de la transferencia lineal de energía. La tabla siguiente da algunos valores de ER para determinados efectos biológicos, en función de la misma.

Transferencia lineal (Kev/ μ)	ER
Hasta 3.5	1
De 3.5 a 7	1 a 2
De 7 a 20	2 a 5
De 20 a 50	5 a 10
De 50 a 200	10 a 20

Para estimar el efecto total producido por una irradiación con varias radiaciones mezcladas debe reducirse todas las dosis a dosis equivalentes de rayos γ o rayos X (equivalentes en cuanto a su efecto). Una radiación de eficiencia relativa a y dosis D, equivale a una irradiación X de dosis aD. Una dosis de 1 Rem es una dosis de radiación que produce el mismo efecto que 1 Rad de radiación X.

$$\text{Dosis en Rem} = \text{Dosis en Rad} \times \text{ER}_i$$

Para radiación γ o β de energía habitual, la ER es alrededor de 1; en el caso de radiación α de pocos MeV la ER se considera alrededor de 10. Los valores reales dependen de los efectos estudiados.

Dosimetría de fuentes gamma

Si un haz colimado de fotones atraviesa un espesor fino de material, algunos fotones son absorbidos o desviados del haz.

$$\Delta I = I(\tau + \sigma + \kappa) \cdot \Delta x;$$

donde ΔI es el número de fotones desviados o absorbidos; I el número de fotones incidentes; τ el coeficiente de interacción fotoeléctrica de esos fotones y ese material; σ el coeficiente de interacción Compton; κ el coeficiente de formación de pares y Δx el espesor (fino) del material. Para fotones emitidos por la mayoría de isóto-

pos usuales la producción de pares es despreciable o nula. En una interacción fotoeléctrica toda la energía del fotón es absorbida en el material; en una interacción Compton parte de la energía se absorbe como energía transmitida a un electrón y parte sale como fotón disperso de menor energía que el incidente. Si ξ es la energía por fotón, e I' el número de fotones incidentes por unidad de superficie y de tiempo, la energía absorbida en el espesor fino anterior es entonces:

$$\Delta E = \xi \cdot I' \cdot (\tau + \sigma_a + K) \cdot \Delta x$$

donde ΔE es la energía absorbida por unidad de superficie y de tiempo, σ_a es el coeficiente Compton de absorción ($\sigma_a = \sigma - \sigma_{disp.}$)

Δx es el espesor (fino) del absorbente y $\xi \cdot I'$ es el flujo de energía incidente. Si un cuerpo de densidad δ está irradiado por fotones con un flujo de energía incidente Φ_P , entonces la dosis en un punto P en la superficie del cuerpo es:

$$D_P = \frac{\Delta E}{\Delta x \cdot \delta} = \Phi_P \cdot \frac{\tau + \sigma_a + K}{\delta} \cdot 0,01 \frac{\text{Rad. g}}{\text{erg}}$$

Al valor $\frac{\tau + \sigma_a + K}{\delta}$ se lo llama coeficiente másico de absorción real (μ_a / δ) y es la fracción de la energía incidente que se absorbe por unidad de masa del absorbente. Los coeficientes básicos de interacción (τ / δ ; σ_a / δ ; σ_d / δ ; K / δ) dependen del material y de la energía de los fotones; el gráfico 1a da valores de μ_a / δ y del coeficiente másico de absorción total para agua en función de las energías.

El coeficiente másico de interacción Compton está dado por

$$\frac{\sigma}{\delta} = \text{cte.} \cdot \frac{Z}{W}$$

siendo Z y W, el número de carga y el peso atómico, respectivamente, del material absorbente.

Para materiales livianos, la absorción de fotones de 0,1 a 2,5 MeV se debe casi totalmente a ese tipo de interacción, por lo que la relación de μ_a/δ para dos materiales livianos, en este rango de energías es:

$$\frac{\mu_{a1}}{\delta_1} = \frac{\mu_{a2}}{\delta_2} \cdot \frac{\frac{Z_1}{W_1}}{\frac{Z_2}{W_2}} \text{ y como } \frac{Z}{W} \text{ es prácticamente constante}$$

(salvo para el H), entonces:

$$\frac{\mu_{a1}}{\delta_1} \approx \frac{\mu_{a2}}{\delta_2}, \text{ es decir que el coeficiente de}$$

absorción másico para fotones de 0,1 a 2,5 MeV es aproximadamente igual para todos los materiales livianos.

El gráfico 1b representa valores del coeficiente másico de absorción real para aire, que en el rango de energías mencionado oscila entre 0.023 y 0.030 $\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$

Exposición: Es a veces importante caracterizar un campo de radiación sin referencia a la dosis en el cuerpo absorbente. Esto puede hacerse si se mide el flujo de energía. Otra posibilidad es colocar un "cuerpo de prueba" y medir la absorción de energía en él; para este fin se suele usar aire. El coeficiente másico de absorción del aire es ligeramente inferior al del agua (porque la relación Z/W es menor para el aire) de modo que a una absorción de 1 erg/g en aire corresponde una absorción de 1.11 erg en agua, siempre que la energía de los fotones sea de 0,1 a 2,5 MeV.

La unidad de exposición es el Roentgen. Un Roentgen produce por ionización, por cm^3 de aire, en aire, una unidad electrostática de cada signo. Como para producir una ionización en aire se requiere en promedio 32.5 eV, y como 1 Roentgen equivale a $\frac{1}{4.8 \times 10^{-10}}$ pares de iones por cm^3 , la energía absorbida por gramo de aire y por Roentgen es:

$$E = \frac{1}{4.8 \times 10^{-10} \text{ cm}^3} \cdot \frac{32,5 \text{ eV} \cdot 1,6 \times 10^{-12} \text{ erg/eV}}{0.00129 \text{ g/cm}^3} \approx 84 \frac{\text{erg}}{\text{g}}$$

Si se conoce la exposición (E_p) en un punto P puede calcularse la dosis en un objeto pequeño colocado en ese punto:

$$\text{Dosis} = \frac{\left(\frac{\mu_a}{\delta} \right)_{\text{objeto}} \times 84 \frac{\text{erg}}{\text{g Roentgen}}}{\left(\frac{\mu_a}{\delta} \right)_{\text{aire}} \times 100 \frac{\text{erg}}{\text{g.rad}}} \times E_p$$

Una exposición de 1 Roentgen, por fotones de 0.1 a 2.5 MeV, equivale según la fórmula anterior a una dosis en tejido acuoso de 0.93 rad.

La dosis en un punto interior de un objeto será menor que la superficial y estará dada por ésta multiplicada por un factor $e^{-\mu x}$, donde μ es el coeficiente de absorción del cuerpo y x es la distancia entre el punto y la superficie.

Exposición producida por una fuente puntual. Una fuente γ puntual emite su energía en todas las direcciones. A una distancia d de la fuente el flujo de energía, despreciando la absorción en aire, es:

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

donde $\dot{I}_d$ es el flujo de energía γ a la distancia d , ϵ la energía total γ emitida por desintegración y A la actividad del emisor

La exposición a la misma distancia es entonces:

$$E_d = \frac{\epsilon \cdot A}{4\pi d^2} \cdot \frac{\left(\frac{\mu_a}{\delta} \right)_{\text{aire}}}{84 \frac{\text{erg}}{\text{g Roentgen}}} \quad (1)$$

Aplicando la ecuación anterior para los diversos radionucleidos, puede calcularse la exposición a un metro de distancia para un curie de emisor ($E \gamma$), valor también simbolizado con m , que es característico del radionucleido.

En la tabla que sigue se dan los valores de $E \gamma$ para los isótopos mas usuales.

<u>Emisor</u>	<u>Exposición por curie</u> <u>a 1 metro (r/hC)</u>
Na ²⁴	1.93
Fe ⁵⁹	0.645
Co ⁶⁰	1.34
I ¹³¹	0.292
Cs ¹³⁷	0.324
Au ¹⁹⁸	0.236
Ra ²²⁶ (en equilibrio con sus hijas)	0.97 (con filtración de 0.5 mm de Pt:Q84)

El gráfico 2 representa el valor E_{γ} para un curie de actividad en función de la energía de los fotones emitidos. Si el nucleido emite varios fotones, el valor E_{γ} se obtiene sumando los valores correspondientes, ponderados porcentualmente.

Las exposiciones a otras distancias pueden calcularse fácilmente basándose en la ecuación (1), resultando:

$$E_d = E_{\gamma} \cdot \left(\frac{1 \text{ metro}}{d} \right)^2$$

Dosimetría de fuentes Beta

Debido al corto alcance de las partículas β , las únicas fuentes externas que tienen significación son las que están en contacto con el objeto.

Los materiales β activos emiten un espectro de energías cuyo valor máximo (E_m) está generalmente tabulado. El pico de la curva de distribución es aproximadamente $1/3$ de la energía máxima, estando corrido hacia valores altos cuando el emisor tiene Z bajo o energía máxima alta, y corrido hacia valores bajos en los casos opuestos.

Cálculo de dosis para fuentes β en contacto con el objeto. El cálculo riguroso de la dosis requiere conocimiento del espectro β y de numerosas consideraciones sobre la interacción de electrones con la materia. No obstante, la dosis puede estimarse con suficiente aproximación por los métodos siguientes, especialmente para casos de interés biológico, tales como fuentes en contacto con la piel.

- 1º) La dosis en la zona inmediatamente en contacto con la superficie puede estimarse teniendo en cuenta la ionización específica producida por las partículas β y el número de partículas que cruzan la superficie por unidad de área.

Como puede verse en el gráfico N° 3, la ionización específica (salvo para β de muy baja energía) es de unos 10 pares de iones por micrón (en tejidos acuosos); como la energía absorbida por par de iones producidos en tejido blando es de unos 35 eV, la transferencia lineal media de energía es de unos 350 eV/micrón. (Para cada energía en particular puede hacerse el cálculo más exacto tomando el número real de pares de iones formados por micrón).

Los electrones incidentes en la piel seguirán trayectos de diferente inclinación (desde rasantes hasta perpendiculares). Como la inclinación promedio es la de 45°, un electrón "promedio" dejará en un espesor pequeño Δ una energía expresada por $350 \text{ eV}/\mu \times \sqrt{2} \times \Delta$. Si la fuente está distribuida sobre una gran superficie de piel, la parte de energía cedida por electrones que parten de una unidad de superficie dada, en zonas no inmediatamente debajo de dicha unidad de superficie, es reemplazada con la entregada por electrones similares de áreas vecinas. Entonces por cm^3 de tejido, en el plano superficial, se depositarán $350 \text{ eV}/\mu \times 10.000 \mu/\text{cm} \times \text{N}^\circ \text{ de } \beta \text{ entrantes por cm}^2 \times 1.6 \times 10^{-12} \text{ erg/eV} \times \sqrt{2}$, es decir:

$$7.9 \times 10^{-6} \frac{\text{erg}}{\text{cm tejido}} \times \frac{\text{N}^\circ \text{ de } \beta \text{ entrantes}}{\text{cm}^2}$$

Como la densidad de los tejidos blandos es muy cercana a 1 g/cm^3 y el número de partículas β entrantes en el tejido es $1/2$ del número emitido, la dosis resulta:

$$\text{Dosis} = \frac{1/2 \text{ Activ./unidad sup.} \times 3.7 \times 10^{10} \frac{\text{des}}{\text{seg. Curie}} \times 7.9 \times 10^{-6} \frac{\text{erg}}{\text{cm}}}{1 \text{ g/cm}^3 \times 100 \frac{\text{erg}}{\text{g Rad.}}}$$

2°) La dosis promedio en un espesor de tejido igual al alcance máximo de las partículas β puede estimarse conociendo las energías máxima y media de las partículas y el número de partículas incidentes por unidad de área. El gráfico N° 5 da los alcances en tejido de densidad 1 gr/cm^3 para partículas de diferentes energías. Si R_β es el alcance los β más energéticos, entonces:

$$\text{Dosis} = \frac{1/2 \text{ Activ./unidad sup.} \times \bar{E}_\beta \times 1.6 \times 10^{-6} \text{ erg/MeV} \times 3.7 \times 10^{10} \text{ des/seg. Curie}}{R_\beta \times \delta \times 100 \frac{\text{erg}}{\text{g. Rad.}}}$$

La dosis estimada por este método es menor que la resultante por el método anterior, pues es la dosis promedio en un espesor de tejido y no la que se absorbe inmediatamente debajo del depósito radioactivo.

Dosimetría de fuentes internas

Los materiales radioactivos 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 lesionado).

Cálculo de dosis por unidad de tiempo

La fracción absorbida de la energía emitida por un radionucleido 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. El gráfico N° 4 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 cuál es la fracción absorbida de la energía emitida por desintegración.

La dosis en un órgano resulta entonces:

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

donde ϵ : 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.

Cálculo de dosis total..- Para gran parte de los órganos la eliminación de material depositado es exponencial:

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

donde C_t es la cantidad de material a tiempo t ; C_o 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 $\left(T_B = \frac{0.693}{k} \right)$

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:

$$D_t = D_o \cdot e^{-(k + \lambda) t}$$

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

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

Nucleido	$T_{1/2}$ (días)	órgano crítico	T_B en órgano crítico (días)
C^{14}	2×10^6	grasa hueso	35 180
Na^{24}	0.62	todo el cuerpo	29
P^{32}	14.3	hueso	1200
S^{35}	87,1	piel	22
Ca^{45}	152	hueso	18000
Fe^{59}	46.3	sangre	65
Co^{60}	1.9×10^3	hígado; bazo	9
Sr^{90}	9.1×10^3	hueso	3.9×10^3
I^{131}	8	tiroides	180
Cs^{137}	1.2×10^4	músculo	140

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

$$\text{Dosis Total} = \frac{D_0}{k + \lambda}$$

$\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$ COEFICIENTES DE ABSORCION DEL AGUA. (TOTAL y REAL)

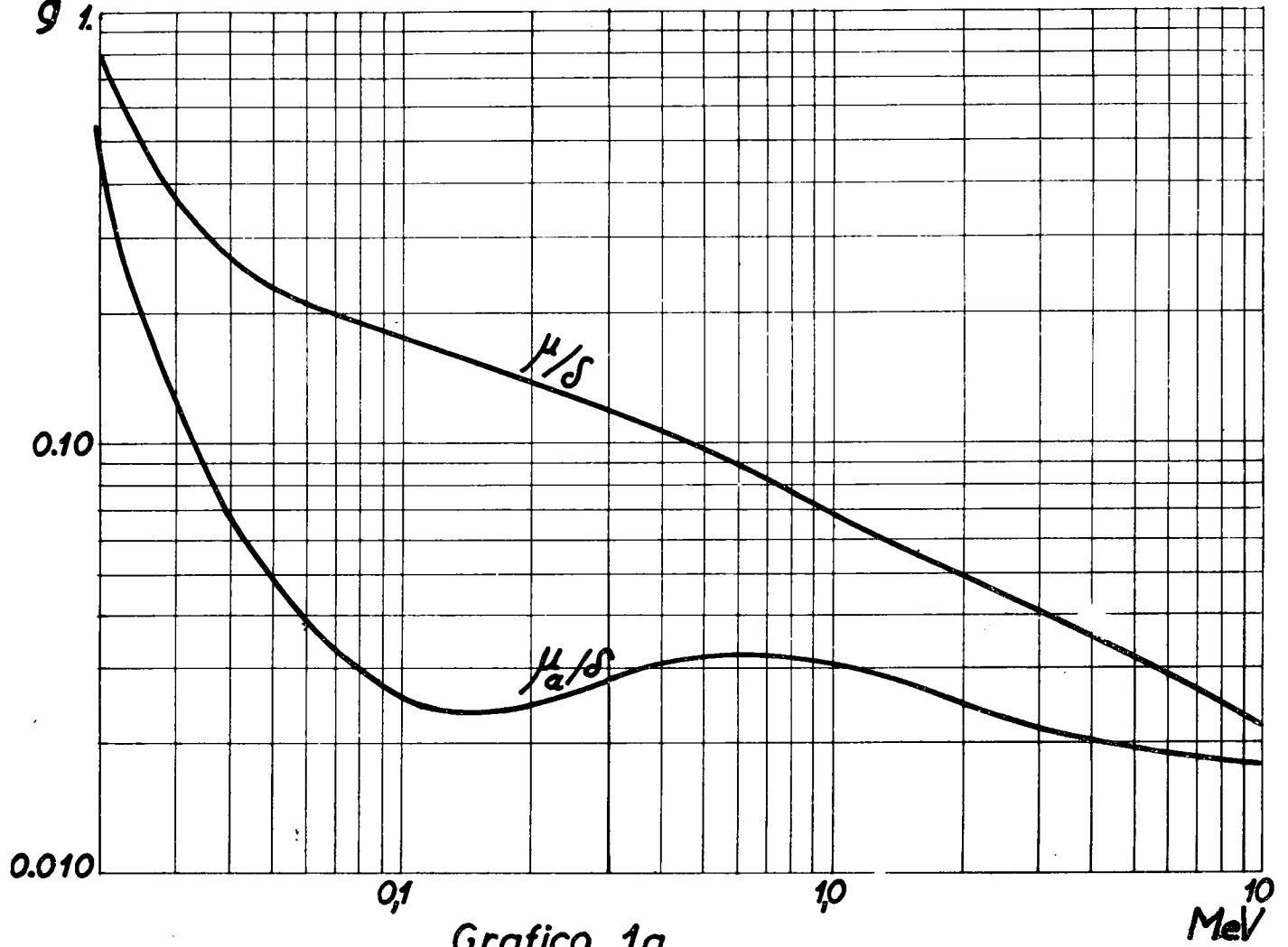
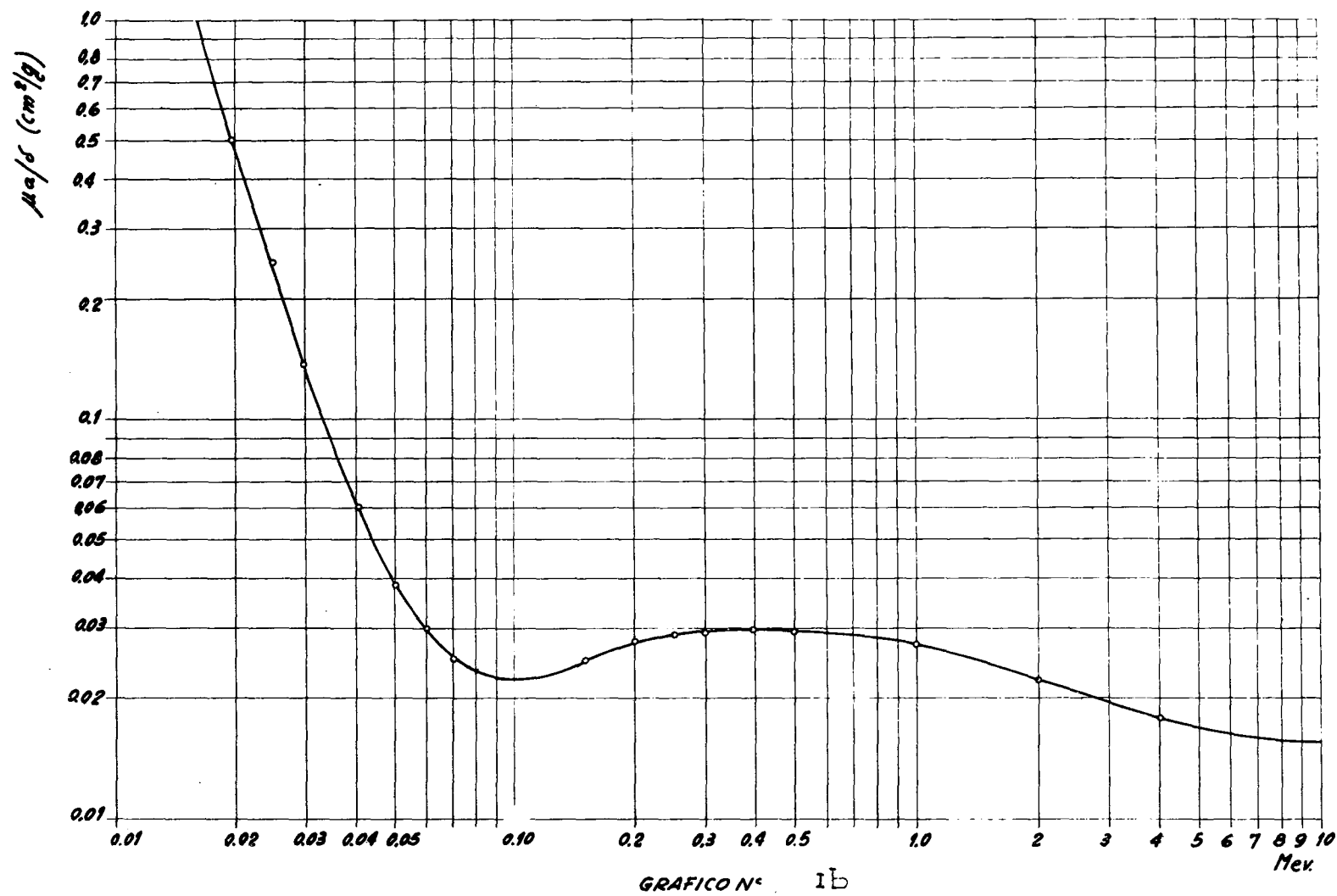


Grafico 1a

COEFICIENTE MASICO DE ABSORCION REAL DEL AIRE.



$E_\gamma [= R h m]$ para un curie de actividad en función de la energía de los fotones.

E_γ
[R/h]

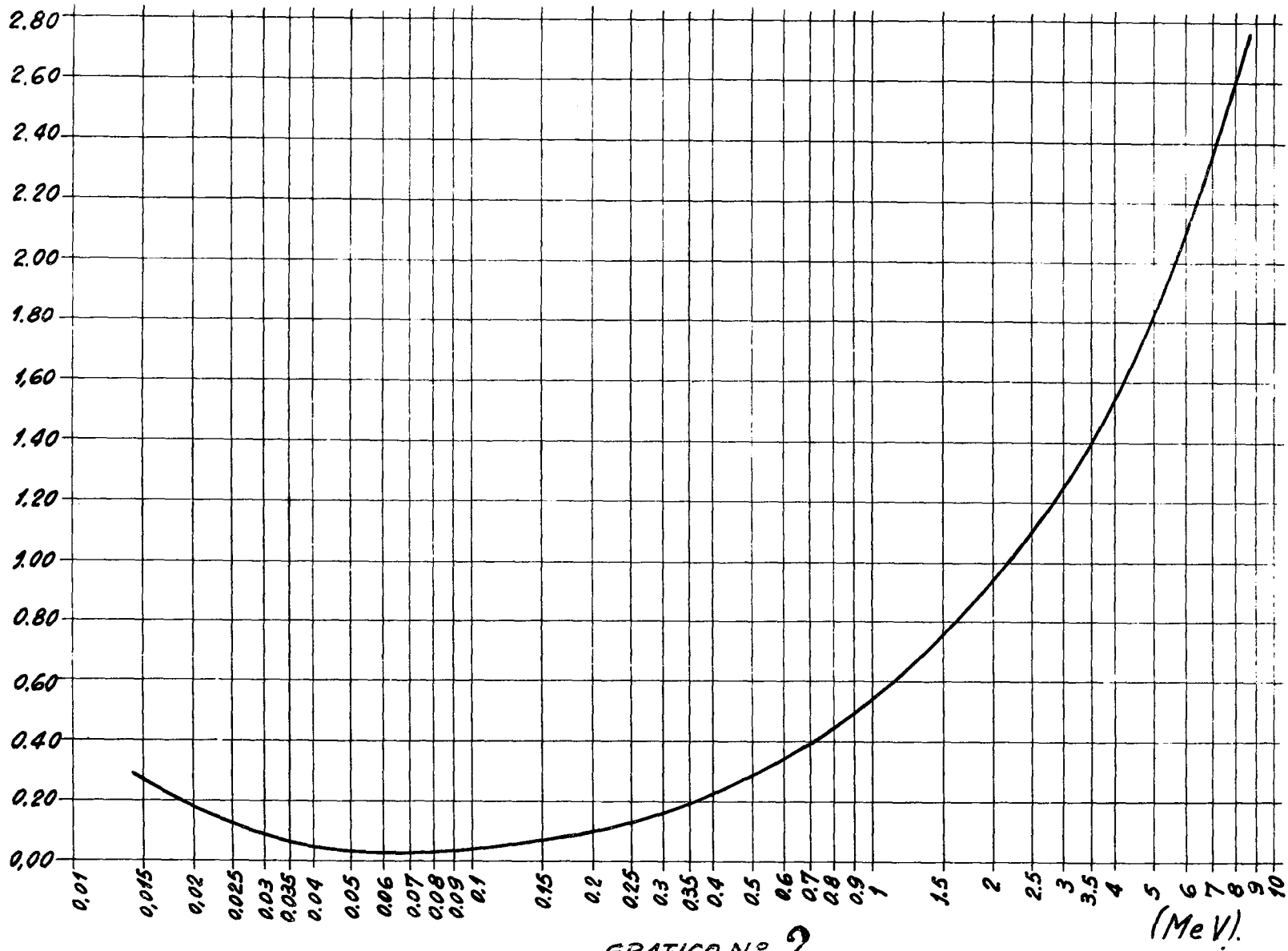
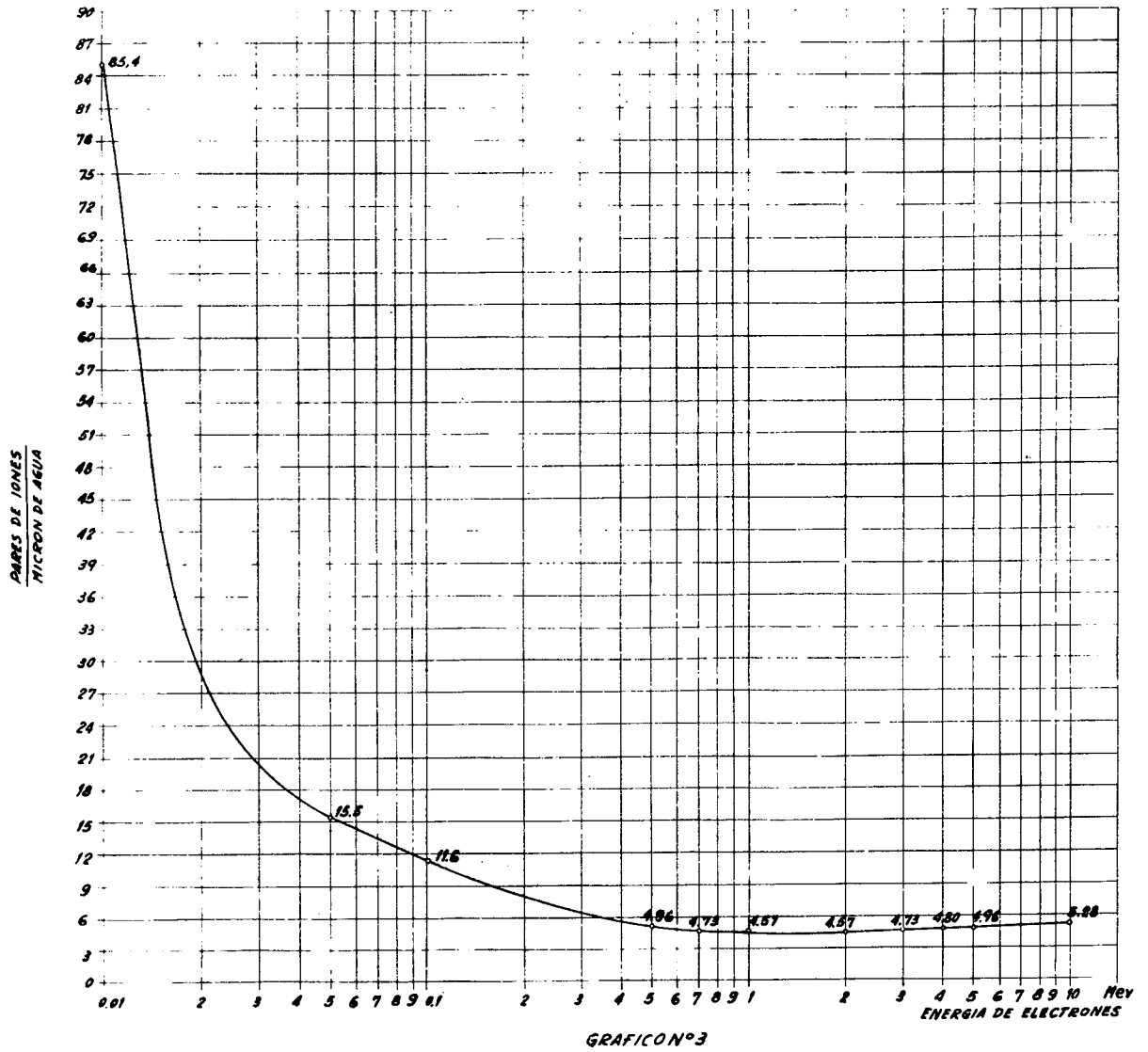
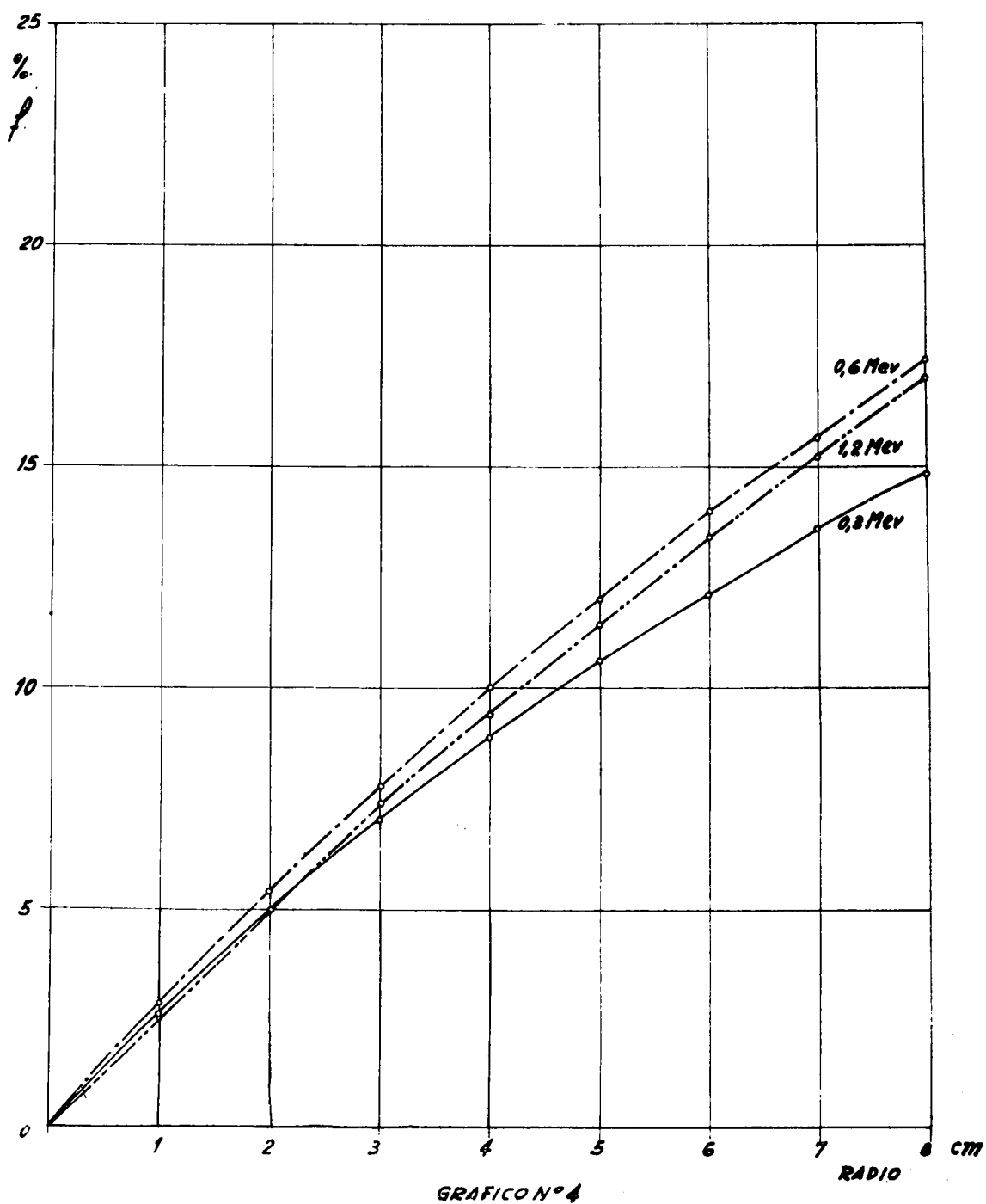


GRAFICO N° 2

IONIZACION ESPECIFICA POR ELECTRONES EN AGUA.



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



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

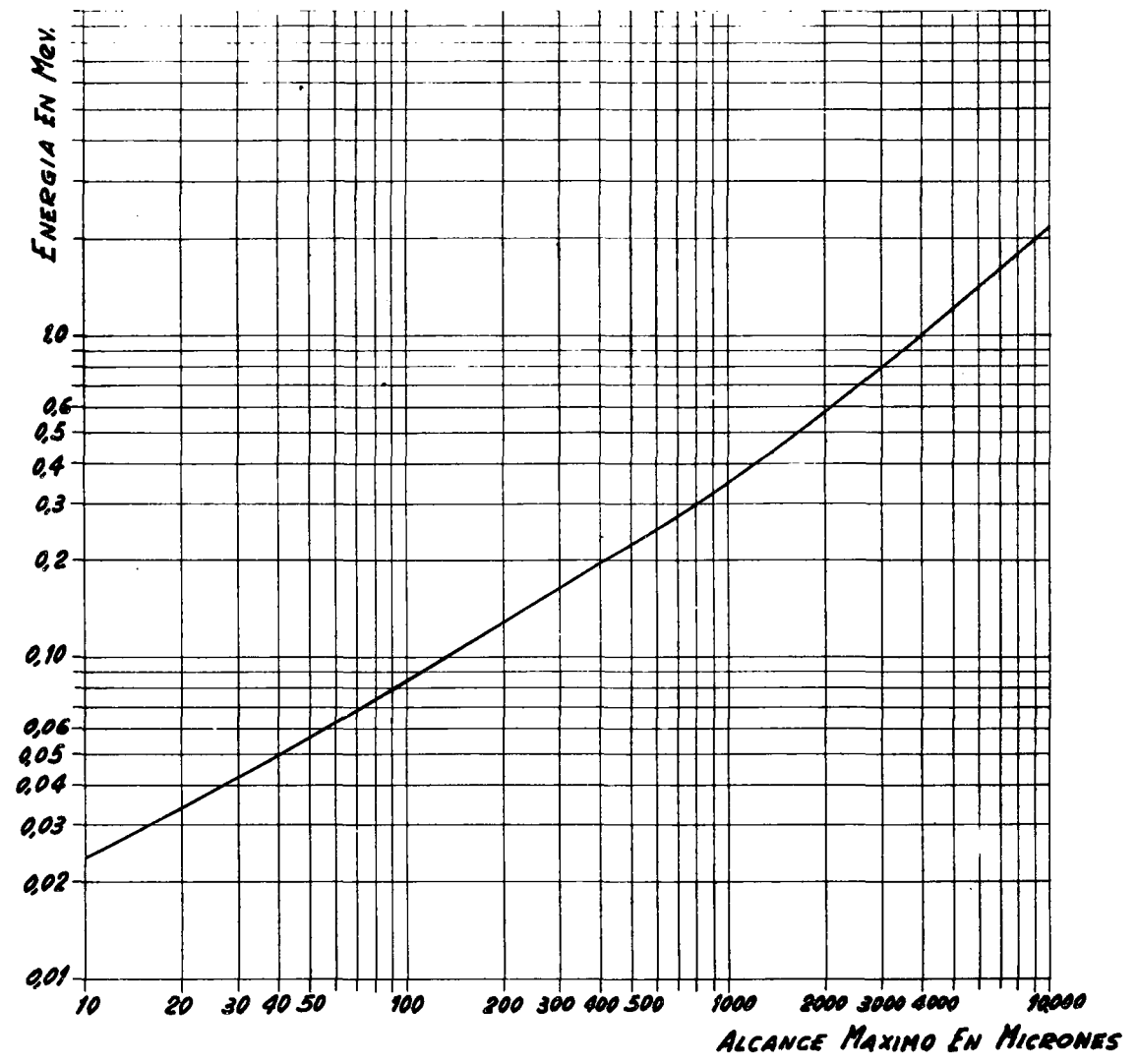


GRAFICO N°5

BIBLIOGRAPHY

- 1.- LEA, D.E. - Actions of radiations on living cells. Cambridge, University Press, (1955).
- 2.- HINE, G.J. and BROWNELL, G.L. - Radiation dosimetry. New York, Academic Press inc, (1956).
- 3.- DAVISSON, C. and EVANS, R. - γ -ray absorption coefficients - Rev. Mod. Phys. 24, 79 (1952).
- 4.- National Bureau of Standards - Handbook 52 (1953).