

CNEA NT 3/80

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

06.80.04

GERENCIA PROTECCION RADIOLOGICA Y SEGURIDAD
SECCION EVALUACION

ANALISIS DE LA DISTRIBUCION DE LAS DOSIS DE
IRRADIACION DE TRABAJADORES PROFESIONALMENTE
EXPUESTOS A RADIACIONES IONIZANTES

CURTI, A.
GOLDSCHMIDT, A.E.

BUENOS AIRES
1980

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

ANALISIS DE LA DISTRIBUCION DE LAS DOSIS DE IRRADIACION
DE TRABAJADORES PROFESIONALMENTE EXPUESTOS A RADIACIONES
IONIZANTES

A. CURTI y A.E. GOLDSCHMIDT^(*)

Gerencia de Protección Radiológica y Seguridad y

(*) actualmente en Gerencia de Investigaciones.

RESUMEN

En el presente trabajo se estudia la distribución de las dosis de irradiación a que están sometidos los trabajadores profesionalmente expuestos a radiaciones ionizantes.

Se observó que las dosis de irradiación externa e interna se distribuyen en forma asimétrica.

Del análisis posterior surgió que la función que mejor describe la distribución de las dosis es la logarítmico-normal o sea que el logaritmo de la variable (dosis) se distribuye según una función Normal de Gauss.

Se describen los diversos parámetros que permiten evaluar dichas distribuciones y compararlas con una distribución de "referencia".

La distribución de "referencia" fue construída teniendo en cuenta criterios de Radioprotección internacionalmente aceptados.

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCION DE LAS DOSIS DE IRRADIACION DE TRABAJADORES PROFESIONALMENTE EXPUESTOS A RADIACIONES IONIZANTES

A. CURTI y A.E. GOLDSCHMIDT^(*)

Gerencia de Protección Radiológica y Seguridad y

(*) actualmente en Gerencia de Investigaciones. C.N.E.A.

Una forma de evaluar los riesgos inherentes a los trabajadores profesionalmente expuestos a radiaciones ionizantes, consiste en analizar las distribuciones de las dosis de radiación, que reciben dichos trabajadores.

La gran cantidad de datos provenientes de los grupos que controlan los niveles de contaminación interna e irradiación externa ha permitido realizar el análisis metódico de tales distribuciones de dosis, observándose que las mismas son marcadamente asimétricas a la derecha (fig.1).

Este hecho estaría justificado en gran parte por la práctica o ejercicio del control sobre las operaciones que implican exposición profesional a las radiaciones, ya que dicha práctica tiende a disminuir el número de personas expuestas a altas dosis.

Para el caso que nos ocupa, es decir las distribuciones de dosis de radiación, se ha determinado que el logaritmo de las dosis se distribuye según una función normal de Gauss (fig.2). Las distribuciones en las que el logaritmo de la variable se distribuye normalmente se denominan log-normales.

Tres características distintivas de las funciones log-normales, y que son comunes a las distribuciones de dosis de radiación, son las siguientes:

a) Están definidas sólo para valores positivos

de la variable (fig.1).

- b) Tienen asimetría positiva.
- c) La distribución acumulada del logaritmo de la variable es una función sigmoidea. Esto implica que para valores extremos de la variable, grandes incrementos de la misma corresponden a pequeñas diferencias de probabilidad (fig.3).

Dado que el estudio de distribuciones de tal tipo es dificultoso, se hace necesario encontrar algún artificio matemático que permita reducir la distribución a alguna función cuyos parámetros sean más fácilmente analizables. Tal sería el caso de la recta.

Por lo tanto, habrá que transformar la ecuación de la distribución log-normal acumulada en una recta, obteniendo, de tal manera, una relación lineal entre las variables.

Ello se logra aplicando la función logaritmo a la variable dosis y el "probit"(*) a las frecuencias relativas acumuladas o probabilidades.

Para definir el "probit" es necesario tomar como base la distribución normal.

Teniendo en cuenta que la ecuación de la función de Gauss es:

$$f(x)dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1)$$

cuyos parámetros característicos son μ (media poblacional) y σ (desviación standard), y que la función normal standar dizada implica $\mu = 0$ y $\sigma = 1$, si se define la variable standar dizada:

(*) "probability unit"

$$u = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (2)$$

resultará:

$$f(u)du = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (3)$$

siendo el campo de variación de la variable $-\infty < u < +\infty$

La función de distribución acumulada de la variable $\underline{u}$, será la integral de la ecuación (3):

$$P = F(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (4)$$

que nos da la probabilidad acumulada, correspondiente al valor standardizado $\underline{u}$. Por ello, el "probit" $\underline{u}$ de la frecuencia relativa acumulada o probabilidad, se define como el conjunto de valores standardizados, que se asocian a dichas probabilidades.

Por lo tanto la recta estará definida por la variación del "probit" en función de la variación del logaritmo de las dosis. Teniendo en cuenta la ecuación (2) resultará:

$$u = \frac{\ln D - \mu}{\sigma} \quad (5)$$

o lo que es lo mismo $u = \frac{\ln D}{\sigma} - \frac{\mu}{\sigma}$ que corresponde a una recta de pendiente $\frac{1}{\sigma}$ y ordenada al origen $-\frac{\mu}{\sigma}$.

Para el cálculo de estos parámetros se utilizó el método de ajuste por cuadrados mínimos.

De esta manera resulta:

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{n \sum_i u_i \ln D_i - \sum_i u_i \sum_i \ln D_i}{n \sum_i \ln^2 D_i - (\sum_i \ln D_i)^2} \quad (6)$$

$$-\frac{\mu}{\sigma} = \frac{\sum_i u_i \sum_i \ln^2 D_i - \sum_i \ln D_i \sum_i \ln D_i u_i}{n \sum_i \ln^2 D_i - (\sum_i \ln D_i)^2} \quad (7)$$

Tal como ocurre en la función $y = \log x$ graficada en papel semilogarítmico, la representación gráfica en papel logarítmico probabilístico de la distribución "log-normal acumulada", es una recta (fig.4).

En este papel, los valores de abscisa siguen una escala logarítmica en tanto que los de la ordenada se distribuyen según una función normal standardizada ($\mu = 0$, $\sigma = 1$) ("probits" correspondientes a los valores de frecuencia relativa acumulada o probabilidad).

Por lo tanto los parámetros de la distribución de la dosis se podrán analizar a partir de los que se obtienen de la ecuación de la recta que representa a tal función en el papel "logarítmico-probabilístico". Los más característicos de ellos son el modo, la mediana y la media.

Dado que el modo (ϵ) es el valor de la variable de mayor probabilidad, haciendo la derivada primera de la función de distribución de las dosis igual a cero:

$$\frac{df(D)}{dD} = 0 \quad \text{con}$$

$$f(D) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{D} e^{-\frac{(\ln D - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

resulta: $\epsilon = e^{\mu - \sigma^2}$ (9)

La mediana (D_g) es el valor de la variable con una probabilidad acumulada del 50%, y para poder deducirla se hará uso de dos características:

- 1.- En las distribuciones simétricas la mediana coincide con la media.
- 2.- En cualquier distribución el valor de los fractiles^(*) de una variable transformada, es idéntico a esa misma transformación aplicada a los fractiles de la variable original.

En este caso, dado que la distribución del "logaritmo de las dosis" es simétrica, resulta:

$$\mu = \text{media}(\ln D) = \text{mediana}(\ln D) = \ln(\text{mediana } D) \quad (10)$$

y entonces: $D_g = e^{\mu}$ (11)

Por último, sabiendo que la media (α) es el promedio aritmético de los valores de la variable a través de todo su campo de variación:

$$\alpha = \int_0^{\infty} D \cdot f(D) \, dD \quad (12)$$

integrando resulta: $\alpha = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$ (13)

(*) En una distribución acumulada se denomina fractil al valor de la variable que corresponde a una dada fracción de dicha distribución.

De todo lo expuesto precedentemente puede inferirse que si una dada distribución de dosis se comporta como una función log-normal, aplicándole las transformaciones ya vistas se llegará a la ecuación de la recta que permitirá el análisis de dicha distribución.

Según ya se dijo, la distribución acumulada estará representada por una recta en papel logarítmico-probabilístico.

En la representación gráfica de las distribuciones de dosis de radiación de trabajadores profesionalmente expuestos se ha observado que, en general, las mismas no se ajustan estrictamente a una distribución log-normal (fig.5).

Esto se debe a que existen sistemas de limitación de dosis que tienden a evitar la superación de los valores máximos establecidos.

Debido a estos desajustes se hizo necesario fijar un criterio para estimar la recta. Para ello se establecieron intervalos fijos de la variable y, arbitrariamente, un factor de correlación mínimo de 0.99, desestimándose para el cálculo todos los datos que lo hicieran menor.

De esta manera se puede realizar un análisis temporal consistente.

Para analizar las distribuciones de dosis de radiación desde el punto de vista de la radioprotección se hace necesario definir una "distribución de referencia" con la cual compararla.

Esta distribución de referencia (fig.6) fue construida teniendo en cuenta criterios de Radioprotección internacionalmente aceptados y sus principales características se pueden resumir como sigue:

- a) La distribución de referencia es "log-normal".
- b) El promedio de las dosis anuales es 0.5 rem, es decir 1/10 del límite establecido.

- c) La probabilidad de que las dosis involucradas sean menores o iguales que el límite anual establecido, es decir 5 rem/año, es del 99.9%. Sus parámetros serán por tanto:

$$\alpha = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} = 0.5 \text{ rem} \quad y$$

$$\beta = e^{\sigma} = 2.39$$

Dado que el verdadero indicador del riesgo o probabilidad de daño radiológico es la dosis colectiva definida por

$$S = \int_0^{\infty} D \cdot N(D) \, dD = \alpha \cdot N \quad (14)$$

donde N es el número de personas involucradas, el análisis de su evolución en el tiempo permitirá conocer el nivel de riesgo radiológico asociado a las distintas prácticas como asimismo justificar las medidas de optimización de dichas prácticas.

Una medida relativa de su magnitud se obtiene comparándola con una "dosis colectiva de referencia", ($S_{\text{ref.}}$), la que puede calcularse a partir de la "distribución de referencia" para el número de personas involucradas.

Un método para medir el desajuste de distribuciones de dosis de radiación respecto de funciones log-normales, es calcular la "dosis colectiva de ajuste" ($S_{\text{aj.}}$) (la correspondiente a la distribución log-normal sin desajustes), y compararla con la dosis colectiva recibida por el personal (S_{real}).

Por último es de interés conocer la fracción de la

dosis colectiva total debida a dosis superiores a 1.5 rem (3/10 del límite establecido) definiendo por tanto:

$$\psi = \frac{S_{1.5}}{S} \quad (15)$$

Este parámetro se compara con su homólogo en la distribución de referencia

$$\psi_{\text{ref.}} = \left[\frac{S_{1.5}}{S} \right]_{\text{ref.}} = 0.31 \quad (16)$$

Este valor de la $\psi_{\text{ref.}}$, calculado a partir de la distribución de referencia, muestra que en la misma la dosis colectiva debida a dosis superiores a 1.5 rem es el 31 % de la dosis colectiva total y, que para este caso particular, la misma está distribuída en el 4.5 % de las personas.

Por lo tanto resultará de interés definir

$$\Omega = \frac{\psi_{\text{real}}}{\psi_{\text{ref.}}} = \frac{\psi_{\text{real}}}{0.31} = 3.23 \psi_{\text{real}} \quad (17)$$

De aquí se puede deducir que Ω puede variar entre 0.00 y 3.23. Cuando Ω es mínimo significa que ninguna persona habrá recibido dosis superiores a 1.5 rem en tanto que si es máximo indicará que todas las personas recibieron dosis superiores a 1.5 rem (fig.7).

Este análisis se ve facilitado por el hecho de haber sido implementado como parte de un sistema de control, proceso y almacenamiento de datos radiológicos (SICON), que la Gerencia de Protección Radiológica y Seguridad de la C.N.E.A. opera sobre un computador IBM 1130, y que permite obtener, toda vez que se desee, las representaciones gráfi-

cas de las distribuciones de dosis y sus parámetros asocia
dos (fig.8), para las diferentes prácticas realizadas.

REFERENCIAS

- 1.- Technical Reports Series N°179 - The Log-Normal Distribution - Chapter 3 - IAEA - Vienna, 1978.-
- 2.- Hald, A.- Statistical Theory with Engineering Applications - John Wiley and Sons, Inc. - New York, 1952.-
- 3.- Meyer, Stuart L. - Data Analysis for Scientists and Engineers - John Wiley and Sons, Inc. - New York, 1975.-
- 4.- Finney, D.J. - Probit Analysis - A Statistical Treatment of the Sigmoid Response Curve - Cambridge at the University Press, 1947.-
- 5.- Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas - Fuentes y Efectos de la Radiación Ionizante - Informe a la Asamblea General - Anexo E - New York, 1977 - Naciones Unidas S.77.IX.1.-
- 6.- Goldschmidt, Adrián E. - Sistema de Información de Control Radiosanitario - Comunicación presentada en la VI Reunión Científica y Primer Encuentro Latinoamericano de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear, 1977.-

DISTRIBUCION TIPICA DE LAS DOSIS EN TRABAJADORES
PROFESIONALMENTE EXPUESTOS A RADIACIONES IONIZANTES

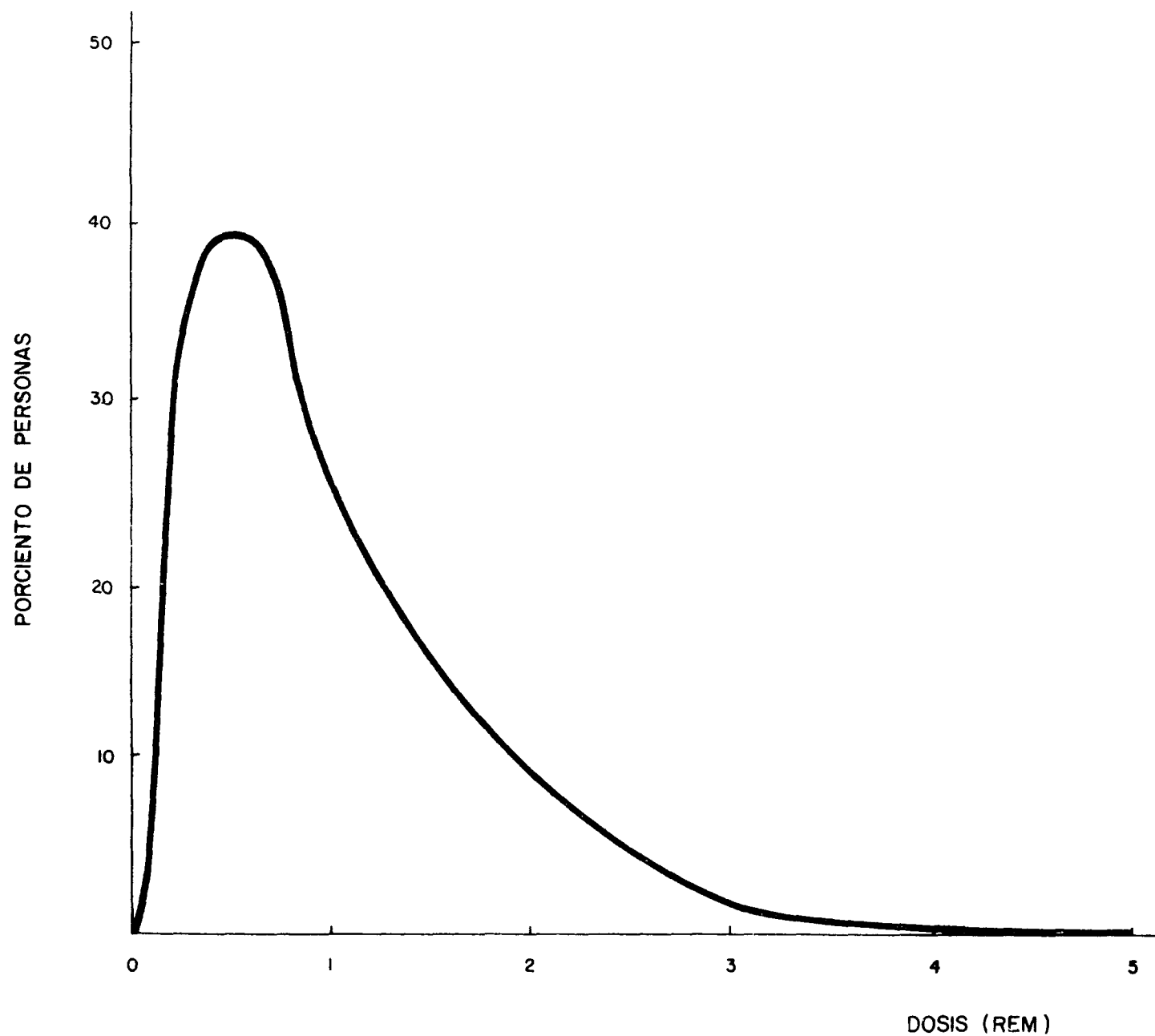


FIGURA 1

DISTRIBUCION NORMAL DEL LOGARITMO DE LAS DOSIS

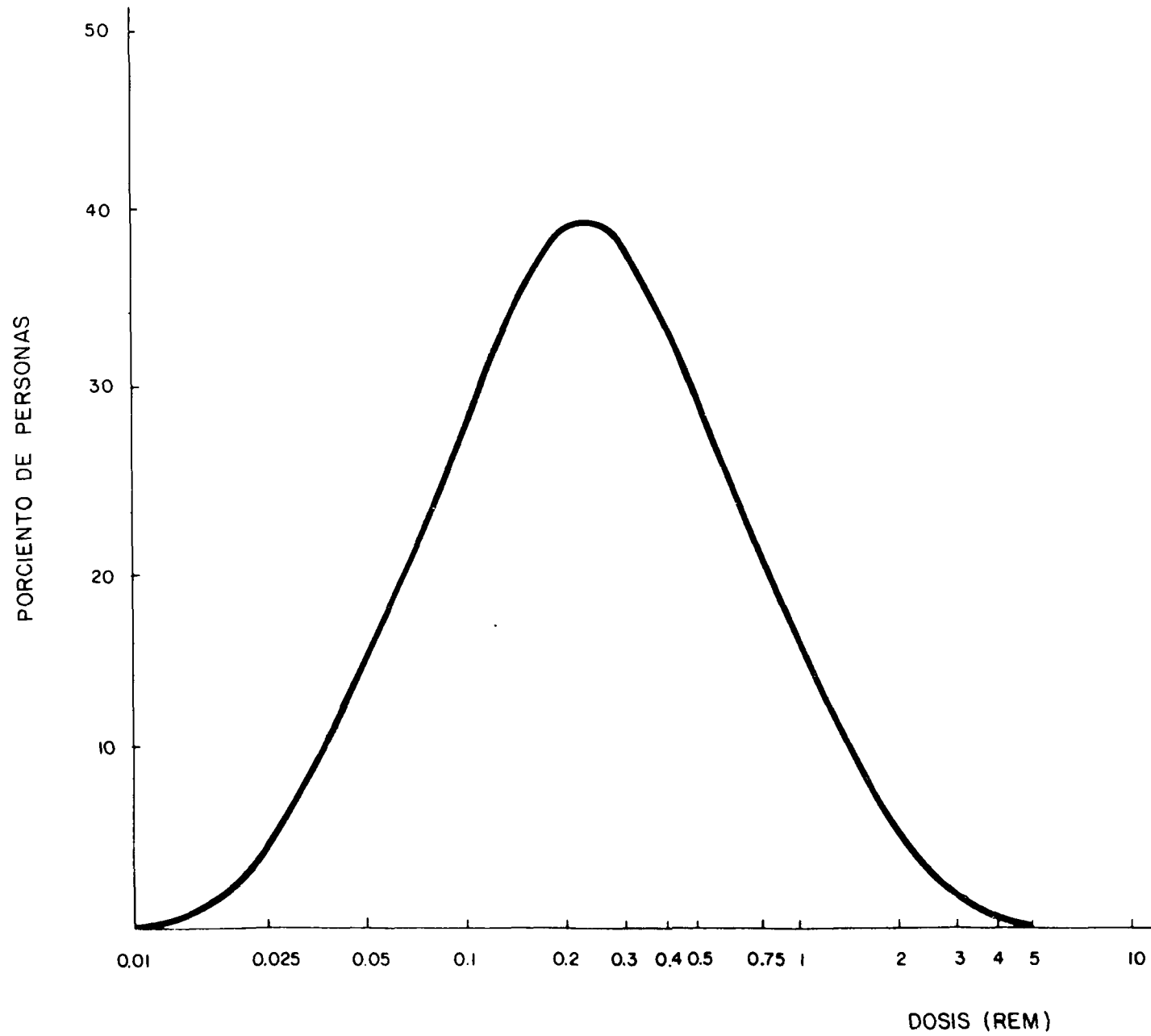


FIGURA 2

DISTRIBUCION ACUMULADA DEL LOGARITMO DE LAS DOSIS

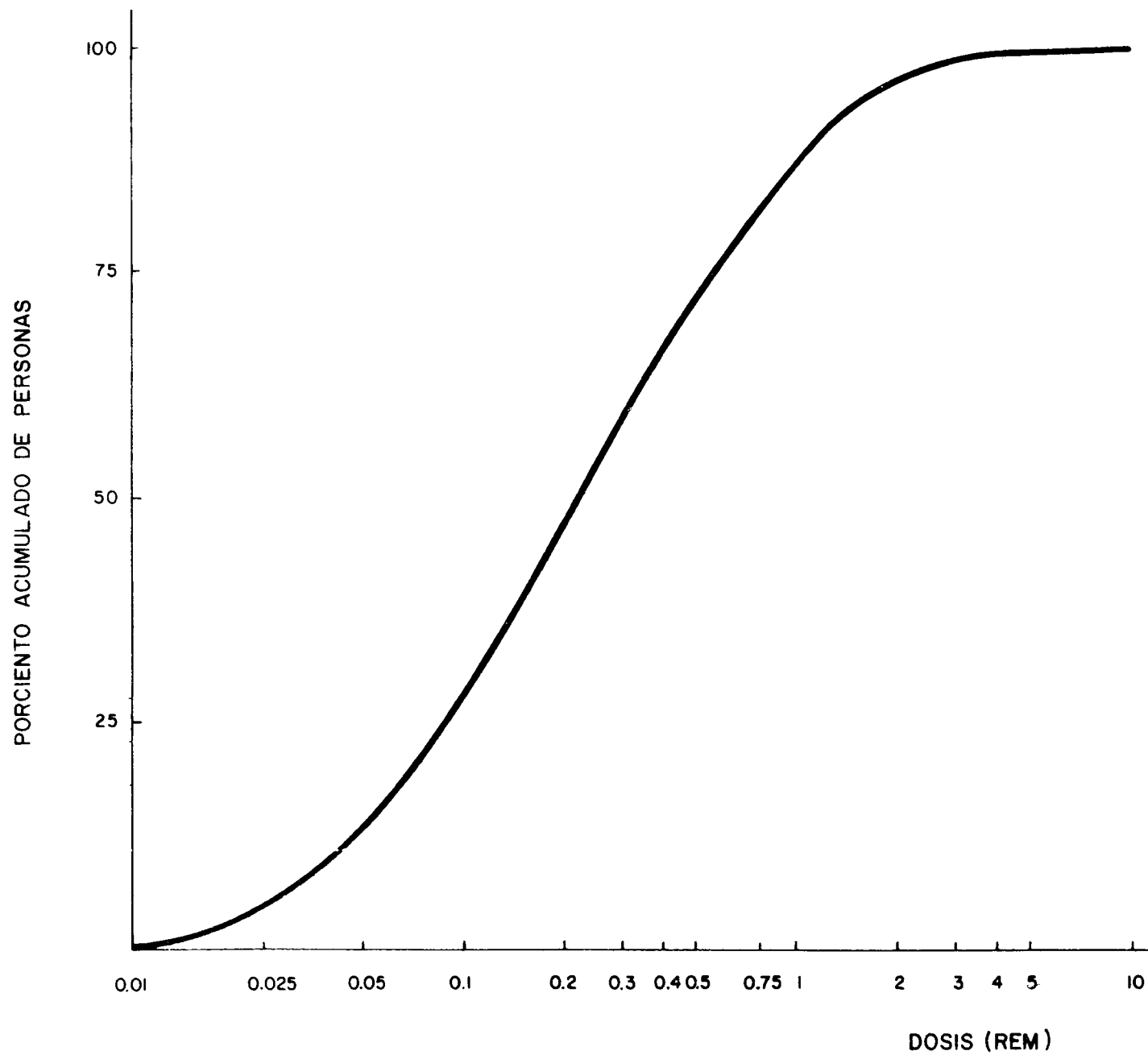


FIGURA 3

TRANSFORMACION GRAFICA DE LA DISTRIBUCION ACUMULADA
DEL LOGARITMO DE LAS DOSIS

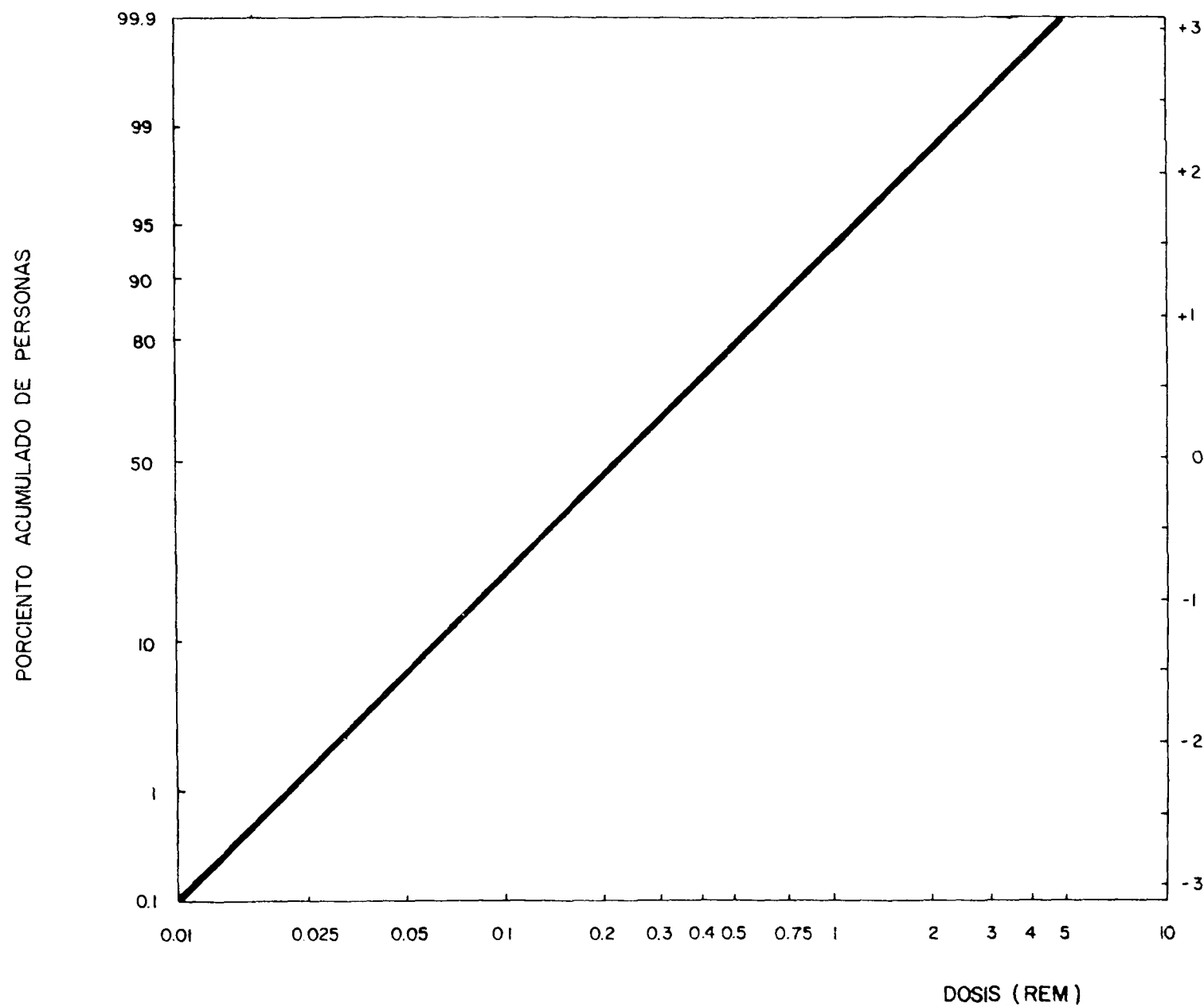


FIGURA 4

DISTRIBUCION DE DOSIS EN EL PERSONAL

CENTRAL NUCLEAR ATUCHA

TRIMESTRE = 2 - 77

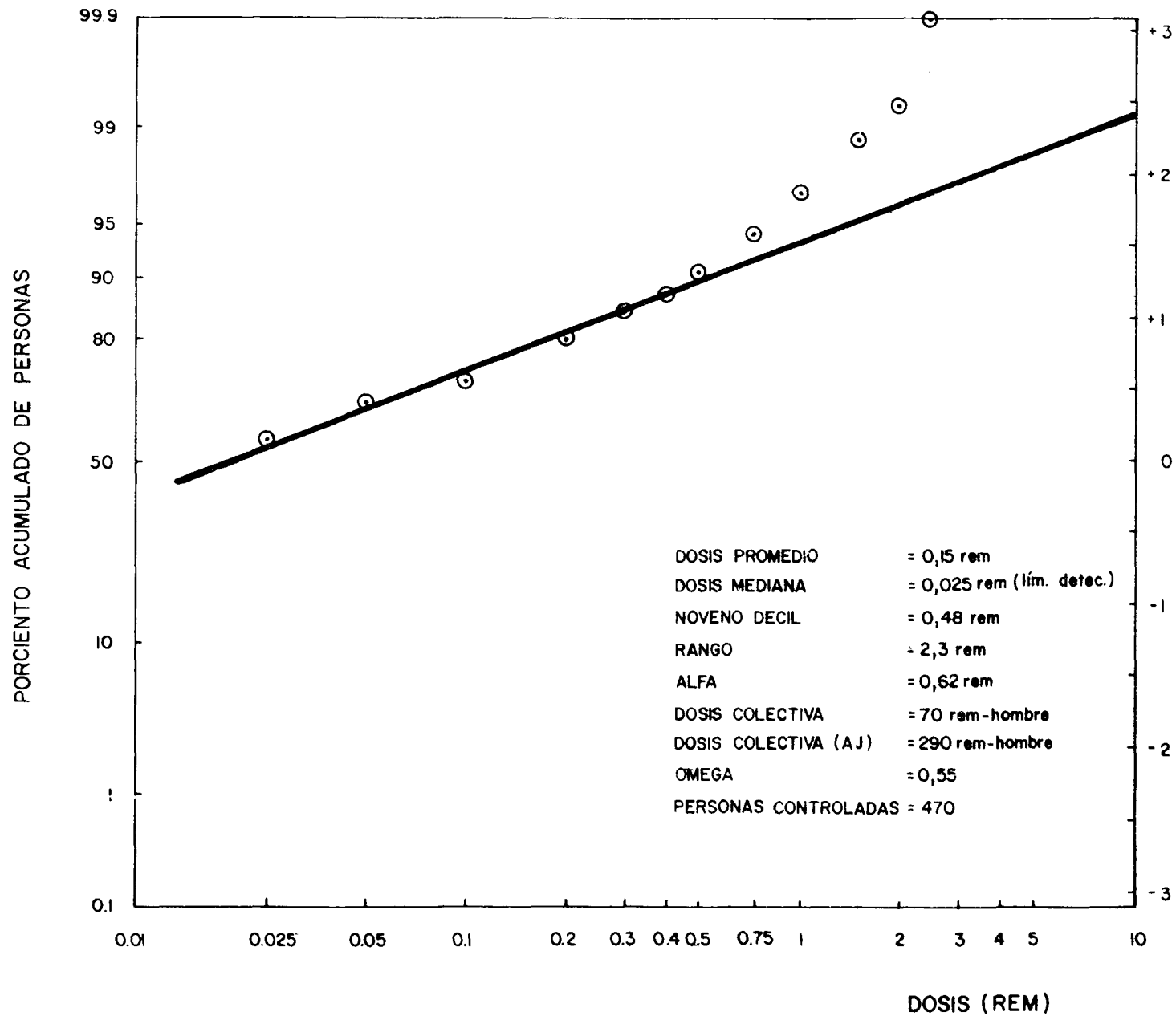


FIGURA 5

DISTRIBUCION DE REFERENCIA (Anual)

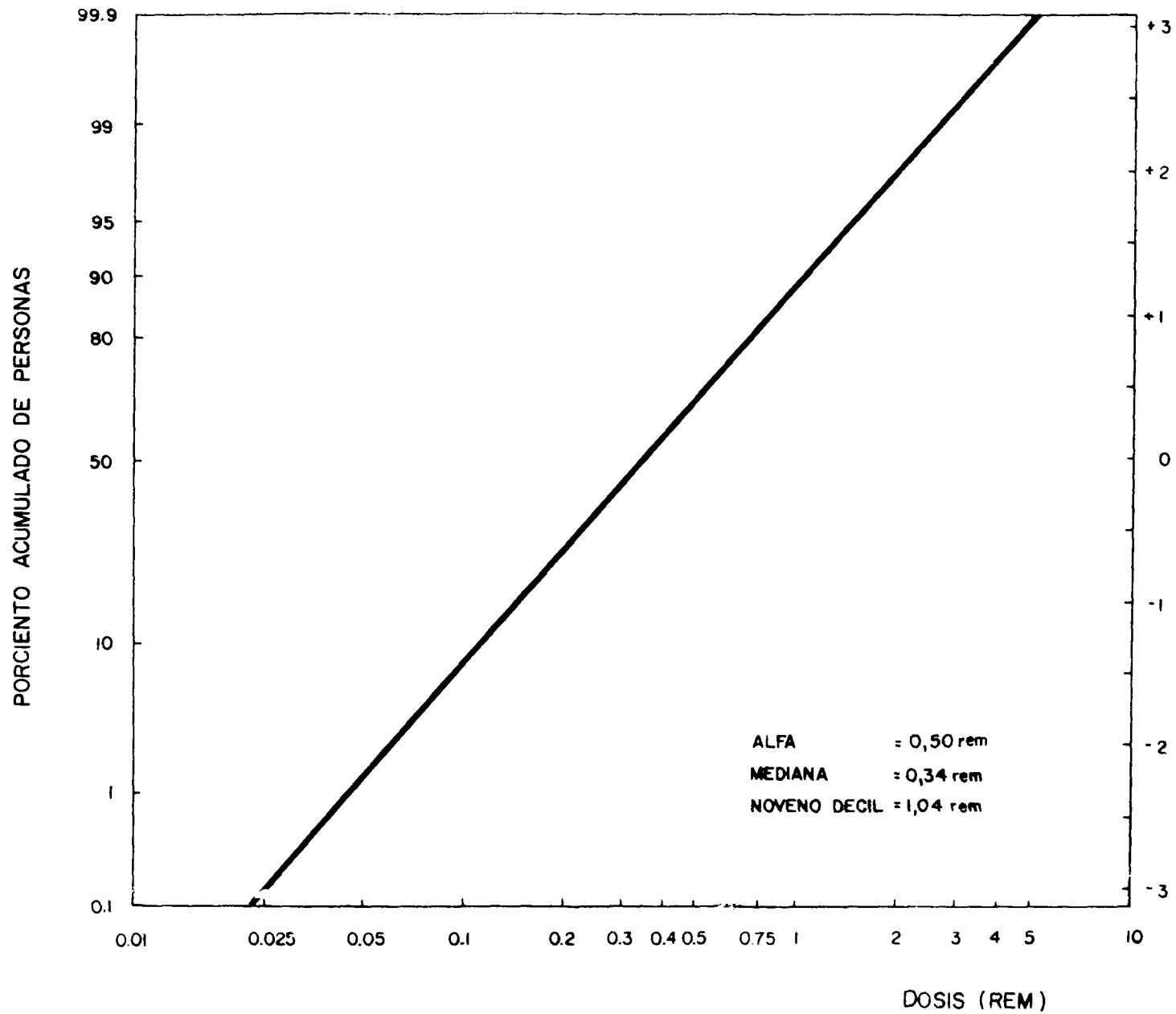


FIGURA 6

RELACION ENTRE Ω Y LA FRACCION DE LA DOSIS COLECTIVA
DEBIDA A DOSIS SUPERIORES A 1.5 REM

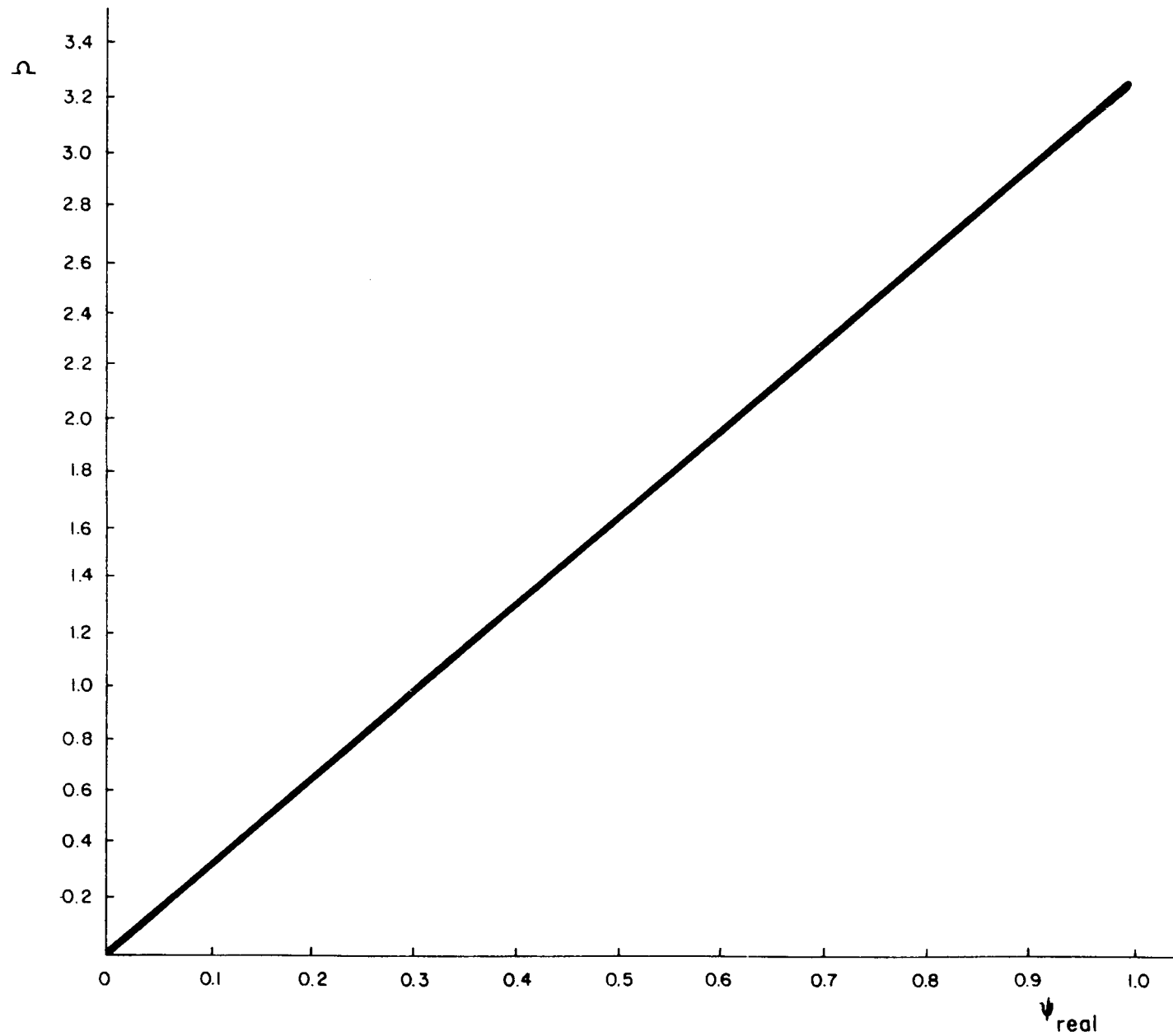


FIGURA 7

INFORME RADIOLOGICO TRIMESTRAL
GRAFICO DE DISTRIBUCION DE DOSIS
PORCIENTO ACUMULADO DE PERSONAS QUE RECIBIERON UNA DOSIS INFERIOR A D(I)

TRIMESTRE= 3-1978

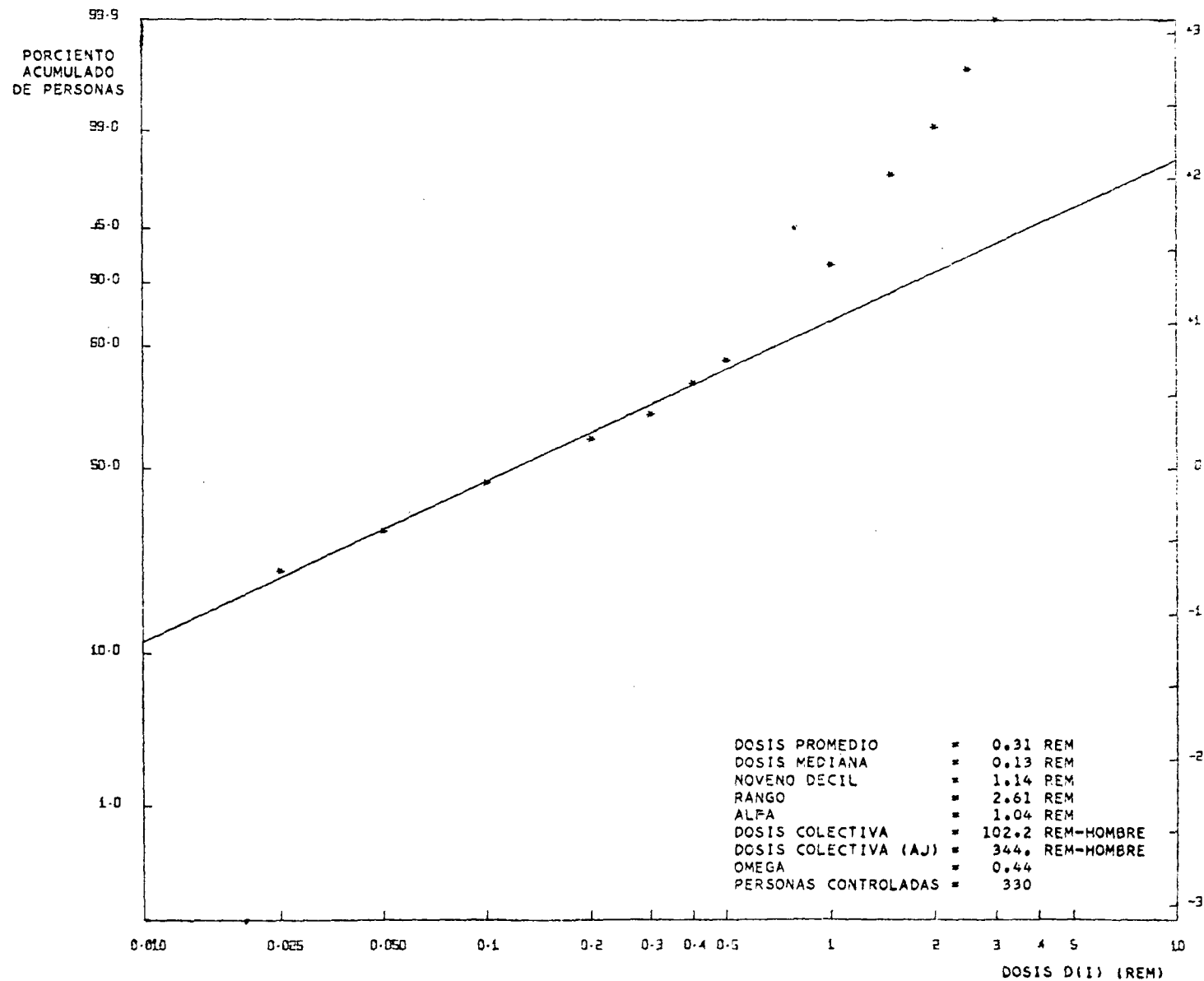


FIGURA 8