

METODOS DE CALCULO DE LA PRECIPITACION  
RADIOACTIVA\*

T. A. Brody, George Rickards C. y Enriqueta G.B. de Velarde  
Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma  
México

(Recibido: 15 febrero 1959)

RESUMEN

*Two methods of calculating  $\beta$  activity,  $^{90}\text{Sr}$  content and infinite  $\gamma$  dose from crude fall-out data are described. The simplified method is adapted to use of desk calculators, but gives only monthly totals of strontium and  $\gamma$  dose, and does not correct for decay between sampling and counting.*

*The more complete method corrects for decay and gives individual data, but requires the use of a high-speed computer; the programming for a machine of IBM 650 type is described.*

*Both methods require knowledge of the sample age, calculated from*

---

\* Este trabajo ha sido realizado por contrato entre la Comisión Nacional de Energía Nuclear y el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México.

*the known dates of explosions. The infinite  $\gamma$  dose is obtained from this by the method of Eisenbud (1956).*

*The results given by the two methods are approximately the same.*

## I. INTRODUCCION

La interpretación de las medidas efectuadas para determinar la radioactividad originada en explosiones nucleares, acarreada por la atmósfera y precipitada sobre el suelo, requiere cálculos bastante extensos por dos razones principales.

En primer lugar el número de muestras necesario para obtener una idea clara de la precipitación radioactiva es relativamente grande, de modo que un cálculo sencillo hecho para cada muestra implica un volumen total de trabajo considerable.

En segundo lugar la actividad determinada por lo general es la de los emisores  $\beta$ . Esta actividad debe reducir a la actividad en la fecha de muestreo, tomando en cuenta el decaimiento, el cual no es exponencial. Además deben calcularse otros datos de gran importancia para la estimación del riesgo que presenta la irradiación de seres humanos por los productos de fisión que forman la precipitación radioactiva. Entre estos datos son de particular importancia (i) el contenido de los isótopos de vida media larga, como el  $^{90}\text{Sr}$  y el  $^{137}\text{Cs}$ ; (ii) la dosis  $\gamma$  infinita recibida por un hombre debido a los emisores  $\gamma$  que se encuentran en la superficie terrestre; (iii) la actividad  $\beta$  total acumulada, tomando en cuenta el decaimiento de las actividades parciales.

En este trabajo se discuten dos métodos de cálculo para obtener la actividad  $\beta$ , el contenido de  $^{90}\text{Sr}$  y la dosis  $\gamma$  infinita de las muestras. Un método de calcular curvas de actividad  $\beta$  total acumulada, tomando en cuenta el decaimiento, se presentará en otra ocasión.

El primero de los dos métodos está adaptado para efectuar el cálculo con máquinas de escritorio, pero no arroja valores para el  $^{90}\text{Sr}$  y la dosis  $\gamma$

infinita para cada muestra ni calcula la actividad  $\beta$  en la fecha de muestreo; estos datos se obtienen sobre los totales, mensuales o cualquier otro período conveniente. El segundo método descrito en el presente trabajo requiere una calculadora de alta velocidad, pero permite obtener datos para cada muestra individual y asegura una mayor exactitud de los resultados.

## II. LA EDAD DE LA MUESTRA

Una mezcla de radioisótopos productos de fisión no decae exponencialmente, ya que está formada de actividades con vidas medias que van de unos segundos a 30 años. Se sabe experimental y teóricamente (Eisenbud 1956, Björnerstedt 1956) que una tal mezcla decae según la ley

$$a(t) = a(0) t^{-1.2} \quad (1)$$

Esta ley de decaimiento fue confirmada siguiendo durante dos meses o más el decaimiento de varias de las muestras de precipitación radioactiva recogidas. En la figura 1 se muestra una de las curvas de decaimiento obtenidas. Se ha graficado  $a^{-1/1.2}$  en función del tiempo y se advierte que los puntos caen satisfactoriamente sobre una recta. Ciertas desviaciones, pequeñas pero sistemáticas, las cuales se han observado en algunas de las muestras cuyo decaimiento se ha seguido, fueron discutidas en un trabajo anterior (Alba 1957). El punto en el cual la recta corta el eje de abscisas indica el instante de actividad infinita, es decir, el instante de la explosión nuclear que produjo la muestra bajo estudio. El tiempo transcurrido entre este instante y la fecha de muestreo recibe el nombre de edad de la muestra.

En la figura 2 los datos de decaimiento se han trazado sobre la gráfica de  $\log A$  contra  $\log t$  calculada teóricamente por Björnerstedt (1956).

La confirmación experimental así obtenida demuestra que los productos de fisión viajan en la atmósfera sin que haya una dispersión sensible en función del peso atómico.

Cuando una muestra representa una mezcla de los productos de fisión de varias explosiones nucleares, su decaimiento no se puede representar ya mediante la ley sencilla (1); debe representarse de la manera siguiente

$$a(t) = \sum_i g_i a_i(0) t_i^{-1.2} \quad (2)$$

donde los  $g_i$  son los coeficientes de ponderación que indican las contribuciones individuales de las explosiones.

En primera aproximación resulta sin embargo posible representar el decaimiento de una muestra originada en varias explosiones si se le asigna una edad promedio  $T$ :

$$a(t) = \sum_i g_i a_i(0) t_i^{-1.2} = T^{-1.2} \sum_i g_i a_i(0) T^{1.2} t_i^{-1.2}$$

$$T = \left\{ \frac{\sum_i g_i a_i(0) t_i^{-1.2}}{\sum_i g_i a_i(0)} \right\}^{-1/1.2} \quad (3)$$

Por lo general es imposible obtener el valor de  $T$  para cada muestra según el método experimental de seguir su decaimiento, no solamente por la extraordinaria acumulación de trabajo que esto representaría, sino sobre todo porque muchas de las actividades resultan demasiado bajas. Es preciso obtener  $T$  por vía de cálculo, para lo cual deben hacerse ciertas simplificaciones.

En primer lugar se carece por completo de datos para determinar los coeficientes de ponderación  $g_i$ , ni se pueden determinar las contribuciones individuales  $a_i(0)$  de las explosiones. En estas circunstancias la única hipótesis posible es de suponer que las intensidades relativas están dadas por

$$g_i a_i(0) = 1 \quad \text{para todos los valores de } i \quad (4)$$

Esta suposición introduce un considerable error si se trata de pocas explosiones, pero si hay que tomar en cuenta 30 o más explosiones, la edad se ob-

tiene con un error del orden de 25 %; al aumentarse el número de explosiones disminuye rápidamente el error.

En segundo lugar no es necesario tomar en consideración todas las explosiones que han ocurrido desde 1945. Solamente las ocurridas durante un cierto número de meses anteriores a la fecha de muestreo tienen una influencia importante sobre el valor de  $T$  obtenido.

La formula utilizada para calcular  $T$  resulta entonces

$$T = \left( \frac{\sum_i t_i^{-1.2}}{k} \right)^{-1/1.2} \quad (5)$$

donde  $k$  es el número de explosiones que se ha tomado en cuenta.

### III. METODO DE CALCULO SIMPLE

Este método, adaptado al empleo de máquinas de escritorio, se basa en el principio de calcular un valor  $T$  que representa una edad aplicable a la actividad total observada durante un mes (u otro período conveniente). El modo de obtener  $T$  fue descrito por Alba (1957); se obtuvo que

$$\bar{T} = \left( \frac{5 \sum_i [ (t_o - d_i)^{-0.2} - (t_m - d_i)^{-0.2} ]}{k t_m} \right)^{-1/1.2} \quad (6)$$

Aquí  $t_m$  es el período considerado (generalmente un mes),  $d_i$  es el tiempo transcurrido entre el principio del período considerado y la explosión  $i$  (positivo si la explosión ocurrió durante el período, negativo si ocurrió antes),  $t_o$  es cero para explosiones anteriores al período e igual a  $d_i + 1$  para explosiones ocurridas durante el período; esta última condición asegura que no diverja la potencia  $-0.2$ .

Para no aumentar inútilmente el trabajo del calculista, la época anterior al período bajo consideración durante la cual se toman en cuenta las explosio-

nes nucleares en el cálculo de  $\bar{T}$  debe limitarse. Fue escogido un tiempo de cuatro meses para esta época, ya que en este tiempo ha habido generalmente más de diez explosiones. Si de estas diez explosiones cinco contribuyen con una intensidad relativa  $g_i$ ;  $a_i(0) = 10$ , y las demás con una intensidad relativa igual a 1 – el caso más desfavorable – el error que resulta al usar la ecuación (6) en vez de la relación (3) es siempre menor que 40 %.

Una vez obtenido el valor de  $\bar{T}$  de esta manera, se utiliza para calcular la dosis  $\gamma$  infinita por el procedimiento indicado por Eisenbud (1956), en el cual se obtienen independientemente la contribución de los primeros 120 días de la edad de la muestra y la contribución del tiempo entre 120 días y 30 años (o infinito: la diferencia es inapreciable, dada la inexactitud de todos los resultados y cálculos, los cuales no pueden dar mucho más que un orden de magnitud)

El procedimiento de Eisenbud se puede resumir en la fórmula

$$\gamma_{\infty} = A \bar{T}^{1.2} (0.86032 \bar{T}^{-0.2} - 0.25595) \quad (7)$$

Aquí  $A$  es la actividad  $\beta$  total del período bajo consideración, en  $\text{mC}/\text{km}^2$ ,  $\bar{T}$  se expresa en días (resulta en esta unidad automáticamente si en la ecuación (5) todos los tiempos la tienen) y  $\gamma_{\infty}$  se obtiene como  $\text{mrad}$ .

La precipitación de  $^{90}\text{Sr}$  durante el período considerado se puede obtener si se supone que  $\bar{T}$  representa la edad de la actividad total del período. A partir de la edad las curvas de Hunter y Ballou (1951) permiten obtener la fracción de  $^{90}\text{Sr}$  contenida en la actividad  $\beta$  total; alternativamente se puede calcular la actividad  $\beta$  que corresponde a la actividad  $\beta$  en esa edad, y mediante las curvas de Bjornerstedt se obtiene la actividad de  $^{90}\text{Sr}$  que le corresponde. De ambos métodos resulta que con un error menor de 1 % la actividad del  $^{90}\text{Sr}$  es

$$A_{\text{Sr}} = 0.0200 A \bar{T} \quad (8)$$

en  $\mu \text{C}/\text{km}^2$ .

#### IV. METODO DE CALCULO PARA MUESTRAS INDIVIDUALES

El método de cálculo descrito en la sección anterior es sencillo y requiere poco tiempo. Pero además de los efectos inherentes de los métodos de muestreo y conteo de la precipitación radioactiva, implica errores debidos a las muy considerables simplificaciones que introduce. No es evidente que estas simplificaciones quedan sin efecto sobre el orden de magnitud de los resultados obtenidos.

En particular puede haber errores de cierta importancia debidos al hecho de que  $A$  es la actividad  $\beta$  total del período considerado, no en las fechas de muestreo, sino al efectuar el conteo. El intervalo entre estos dos momentos puede ser de varios días; como el decaimiento es rápido para muestras con una actividad proveniente de una explosión reciente, y son precisamente éstas las que más contribuyen al total, existe un error acumulativo, cuya estimación es difícil.

Por estas razones, y también para facilitar el trabajo del calculista, se elaboró una programación para efectuar los cálculos en una máquina automática IBM tipo 650. En la programación se incorporaron las siguientes modificaciones del método simple:

- (i) Para calcular  $T$ , se toman en cuenta las explosiones ocurridas durante 1 año anterior a la fecha de muestreo, en vez de 4 meses.
- (ii) La edad,  $T$ , se calcula individualmente para cada muestra.
- (iii) A partir de la edad, se calcula  $a'$ , la actividad de la muestra en la fecha de muestreo, mediante la relación

$$a' = a \left( \frac{T}{T+d} \right)^{1.2} \quad (9)$$

donde  $d$  es el número de días transcurridos entre el muestreo y el conteo de la muestra.

- (iv) En la ecuación (7) para calcular la actividad del  $^{90}\text{Sr}$  se utiliza  $a'$  en vez de  $a$ , lo cual da un mejor resultado, ya que  $T$  es el tiempo entre la "explosión promedio" y el muestreo.

Además, el programa verifica un cierto número de datos: verifica que las fechas corresponden al período que se está calculando, que la actividad registrada no es excesiva, que el fondo que hay que restar para obtener la actividad neta en pulsos por minuto no está fuera de ciertos límites (lo cual indicaría o bien un malfuncionamiento del contador o una contaminación accidental del contador o del portamuestras), finalmente que el cálculo efectuado sobre los datos brutos se ejecutó sin errores de máquina.

Para introducir los datos en la máquina se perforan en tarjetas IBM. Los diferentes tipos de tarjetas se identifican mediante un dígito en una columna reservada para la identificación. El grupo de tarjetas tipo 1 contiene las fechas de las explosiones nucleares. El grupo de tarjetas tipo 3 contiene los datos para el cálculo de los fondos: fecha, número total de pulsos, tiempo de conteo, y número del contador. El grupo de tarjetas tipo 5 contiene los datos de las muestras: fecha del conteo, número del contador, número total de pulsos, tiempo de conteo, fecha de muestreo, indicación de si se trata de la primera vez que se cuenta la muestra, número de la estación, número progresivo de la muestra, y clave alfabética de la estación. Además se usan 3 tarjetas de control: una tarjeta tipo 2 que señala la primera fecha del período para el cual se hace el cálculo, una tarjeta tipo 4 que señala que el último dato de los fondos ha entrado, inicia el cálculo y la perforación de los resultados de fondos e impide entrada de tarjetas tipo 1, 2 o 3, una tarjeta tipo 9 que restaura el programa para que se pueda iniciar de inmediato el cálculo de un nuevo período.

El cálculo se efectúa de la manera siguiente: (un diagrama de bloques se encuentra en la fig. 3):

1.- Las fechas ( $f_3$ ) de las explosiones son convertidas en el número de días a partir del 1-I-1954 ( $x_3$ ) y almacenadas en orden ascendente en una tabla.

2.- La fecha ( $f_0$ ) en la cual se inicia el período que se está calculando es convertida en el número de días correspondientes ( $x_0$ ).

3.- La fecha ( $f_2$ ) de la determinación de un fondo es convertida en el número de días correspondiente ( $x_2$ ), a éste se le resta  $x_0$  para obtener el número



ro que identifica el casillero que debe contener los datos de fondo y el número total de pulsos y el tiempo de conteo se suman a las cantidades contenidas en los casilleros correspondientes en aquella parte de la tabla de fondos que corresponde al contador utilizado.

4.- Se cambian las instrucciones iniciales para impedir la entrada de tarjetas tipo 1, 2 o 3 y permitir la entrada de tarjetas tipo 5. Se calcula el fondo promedio, dividiendo el número total de pulsos de todos los conteos de fondo entre el tiempo total de conteo. El resultado se almacena en la tabla de fondos y además se perfora una tarjeta que contiene todos los datos correspondientes y lleva como identificación el número 6. Esto se repite para todos los casilleros que contienen datos de fondos.

5.- Se calcula

$$n = \frac{N}{t} \left( 1 + \frac{N}{t} \tau \right) \quad (10)$$

Aquí  $N$  es el número total de pulsos contados,  $t$  el tiempo de conteo y  $\tau$  es el tiempo muerto del contador, el cual para el tipo de tubos Geiger empleados tiene un valor de  $3 \times 10^{-4}$  seg. Después de corregir de esta manera por el tiempo muerto, se resta el fondo que corresponde a la fecha de conteo y al contador empleado ( $F$ ) y luego se multiplica por un factor  $A(C)$ , el cual es el producto de la eficiencia del contador, del factor de conversión de pulsos por minuto a actividad en milicuries y de un factor que convierte el área de la hoja engomada ( $28 \times 28 \text{ cm}^2$ ) al área de  $1 \text{ km}^2$ .  $A(C)$  es función del número  $C$  del contador y se determina experimentalmente, utilizando la emisión  $\beta$  del  $^{40}\text{K}$  como patrón. La experiencia con los tubos Geiger de ventana delgada que se emplean en estas mediciones, ha demostrado que no es necesario recalibrar con mucha frecuencia; una calibración cuidadosa, en la cual se corrige por el efecto de la autoabsorción en las muestras patrón, se lleva a cabo al instalar un nuevo tubo y después cada 6 meses; la calibración se controla cada dos semanas mediante el conteo de una sola muestra patrón.

Si se trata de una muestra contada por primera vez, se convierte la fecha ( $f_1$ ) en el número de días correspondiente ( $x_1$ ) y se calcula la edad de la

muestra,  $T$ , mediante la ecuación (5), tomando en cuenta todas las explosiones con fechas entre  $x_1 - 365$  y  $x_1$ . Una vez obtenido el valor  $T$ , se calculan la actividad en la fecha de muestreo,  $a'$ , la dosis  $\gamma$  infinita,  $\gamma_\infty$ , y el contenido de  $^{90}\text{Sr}$ ,  $a_{\text{Sr}}$ , mediante las ecuaciones (7), (8), y (9), empleando  $T$  en vez de  $\bar{T}$  en las ecuaciones (7) y (8),  $a'$  en vez de  $A$  en la ecuación (8) y  $a$  en vez de  $A$  en la ecuación (7). Los resultados obtenidos, junto con los datos de identificación de la muestra, se perforan en una tarjeta tipo 7.

Si no se trata de el primer conteo de la muestra, los cálculos descritos en el párrafo anterior no se efectúan, y el valor de  $a$ , junto con la identificación de la muestra se perfora en una tarjeta tipo 8.

6, 7 y 8. Estos tipos de tarjeta no contienen datos sino resultados del cálculo. Si por error entraran a la máquina, ésta se para y señala el error.

9. Esta tarjeta restaura a ceros el contenido de las tablas de explosiones y de fondos, impide la entrada de tarjetas tipo 5 y permite la entrada de tarjetas 1, 2 y 3.

Las tarjetas tipo 7 se clasifican según la estación de la cual se enviaron las muestras, se colocan en orden ascendente de fechas y se listan en una máquina tipo IBM 420, 421 o similar, la cual simultáneamente suma  $a'$ ,  $\gamma_\infty$ ,  $a_{\text{Sr}}$  para el período bajo consideración y para cada estación.

## V. COMPARACION DE LOS METODOS

El método de cálculo con máquina automática tiene dos ventajas prácticas importantes sobre el método manual. En primer lugar da una seguridad mucho mayor contra errores de cálculo. En segundo lugar el cálculo se efectúa con gran rapidez; muestras contadas por primera vez se calculan a razón de 28 por minuto, muestras recontadas a razón de aproximadamente 100 por minuto y los datos de explosiones y fondos se introducen a un ritmo de 200 por minuto. En total el cálculo para unas mil muestras se lleva a cabo en tres cuartos de hora.

A fin de obtener una comparación entre los resultados calculados con los dos métodos, ambos se emplearon durante varios meses. No se advirtieron

diferencias de importancia, hecho que contribuye a justificar las aproximaciones del método manual.

Las diferencias observadas fueron las siguientes:

(i) La actividad  $\beta$  total mensual resulta mayor al calcularse con la máquina automática. Esto se nota en la figura 4, la cual da los resultados para la estación de Veracruz durante el mes de noviembre de 1958. La diferencia entre  $a$  y  $a'$  depende fuertemente de la edad de la muestra; en el primer pico de la figura 4 esta edad es pequeña y  $a'/a > 2$ , y en las dos observaciones que siguen se observa la rápida disminución de esta relación a medida que crece  $T$ . Cuando la frecuencia de las observaciones es 1/día o más, se puede notar que el pico en la gráfica de  $a'$  ocurre desplazado hacia el futuro con respecto al pico de la gráfica de  $a$ . La fig. 5 muestra  $T$  y  $k$  para el mismo mes.

(ii) La dosis  $\gamma$  infinita resulta un poco mayor en el cálculo automático que en el cálculo simple, principalmente debido al aumento en la actividad  $\beta$ .

(iii) El contenido de  $^{90}\text{Sr}$  disminuye si hubo varias explosiones durante el principio del período bajo consideración o inmediatamente antes; este efecto resulta de que la edad atribuida a las muestras más activas es bastante menor que el valor de  $\bar{T}$  calculado para todo el período. En otras circunstancias el valor obtenido para el  $^{90}\text{Sr}$  también tiende a aumentar.

En otro trabajo (Alba 1959) se comparan los datos obtenidos para el estroncio 90 con la actividad de este radioisótopo medida radioquímicamente en las aguas pluviales. La comparación demuestra una concordancia satisfactoria en cuanto al orden de magnitud de los resultados. El valor calculado es sistemáticamente menor que el valor medido durante los meses lluviosos; la diferencia puede explicarse por el hecho de que el cálculo no toma en cuenta la gradual precipitación del  $^{90}\text{Sr}$  debido a explosiones más de un año anteriores a la fecha de muestreo, las cuales contribuyen significativamente a la actividad total de  $^{90}\text{Sr}$  pero casi no influyen sobre la actividad  $\beta$  total de una muestra de origen reciente, en la cual los emisores  $\beta$  de vida media corta predominan.

Se nota que ambos métodos de cálculo dan una primera aproximación para los resultados de interés; se obtiene correctamente el orden de magni-

tud. El segundo método, empleando una calculadora automática, reduce considerablemente el trabajo del calculista, asegura una menor frecuencia de errores de cálculo y probablemente arroja resultados que se acerquen más a la realidad, aunque las diferencias no son importantes.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos agradecer la ayuda afrecida por la Comisión Nacional de Energía Nuclear, la cual hizo posible este trabajo.

Nos es grato reconocer la manera rápida y eficaz con que el Centro Electrónico de Cálculo de la Universidad Nacional Autónoma de México ejecutó los cálculos que se han descrito. El trabajo de máquina estaba a cargo del Sr. Raúl Ortega, cuya valiosa cooperación quisiéramos agradecer.

## VII. REFERENCIAS

- |                                       |      |  |
|---------------------------------------|------|--|
| Alba A., F., et al.                   | 1957 | Tercer informe sobre estudios de la precipitación radioactiva. Rev.MexFís. 7, 1 (1957)   |
| Alba A., F., et al.                   | 1959 | Cuarto informe sobre estudios de la precipitación radioactiva. Rev.Mex.Fís. 8 (por publicarse)   |
| Björnerstedt, R., K. Löw y S. Ulvönäs | 1956 | Products of Simultaneous Fission, Forsvarets Forskningsanstalt, Avdelning 2, Intern. Rapport B 150F.   |
| Eisenbud, M., J.H. Harley et al.      | 1956 | Proposed Uniform Procedures for Collection of Fallout Samples. Submitted to the UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations, March 1956. |
| Hunter, H. F., y N. E. Ballou         | 1951 | Nucleonics, 9, C-2   |

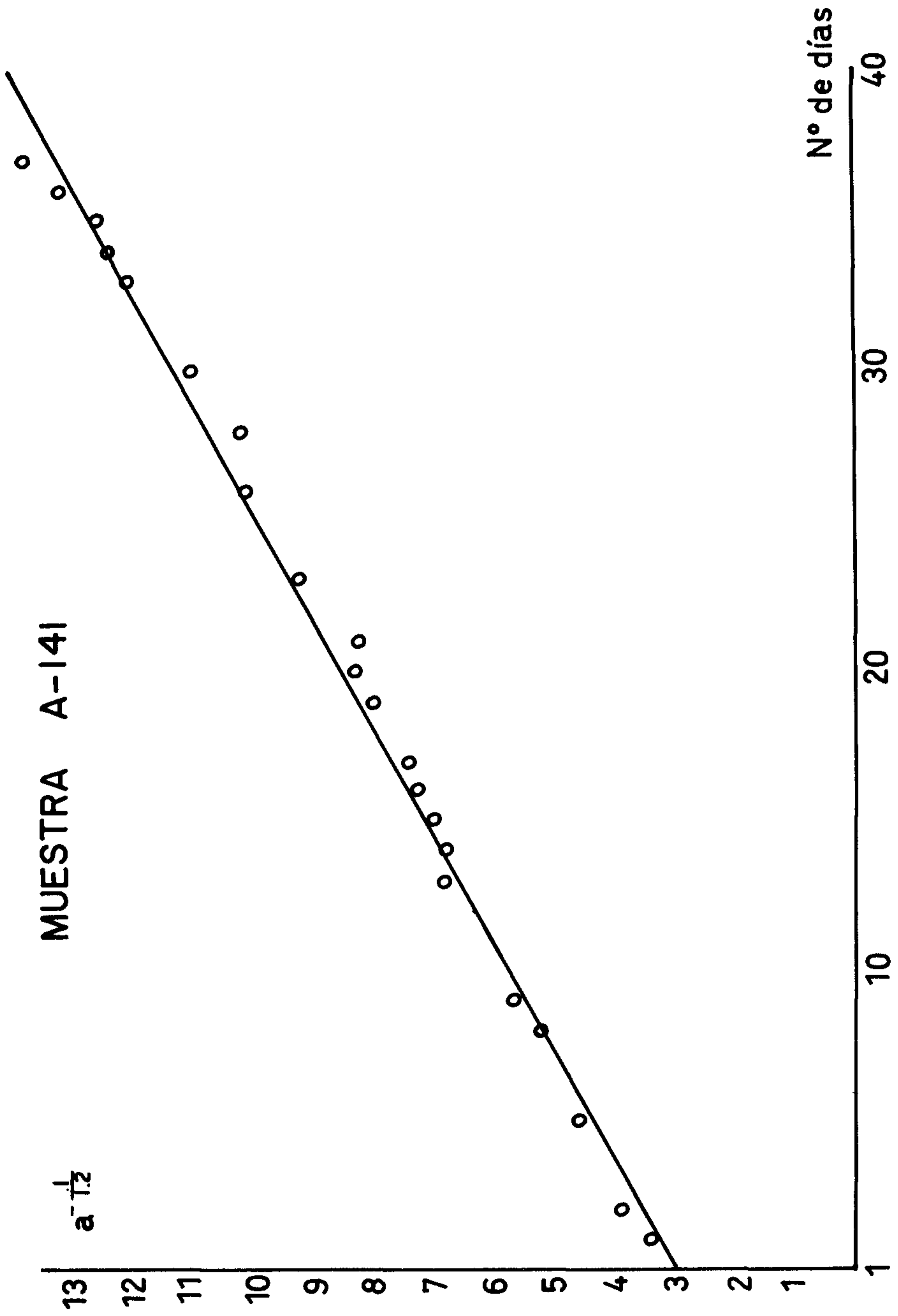


Fig. 1

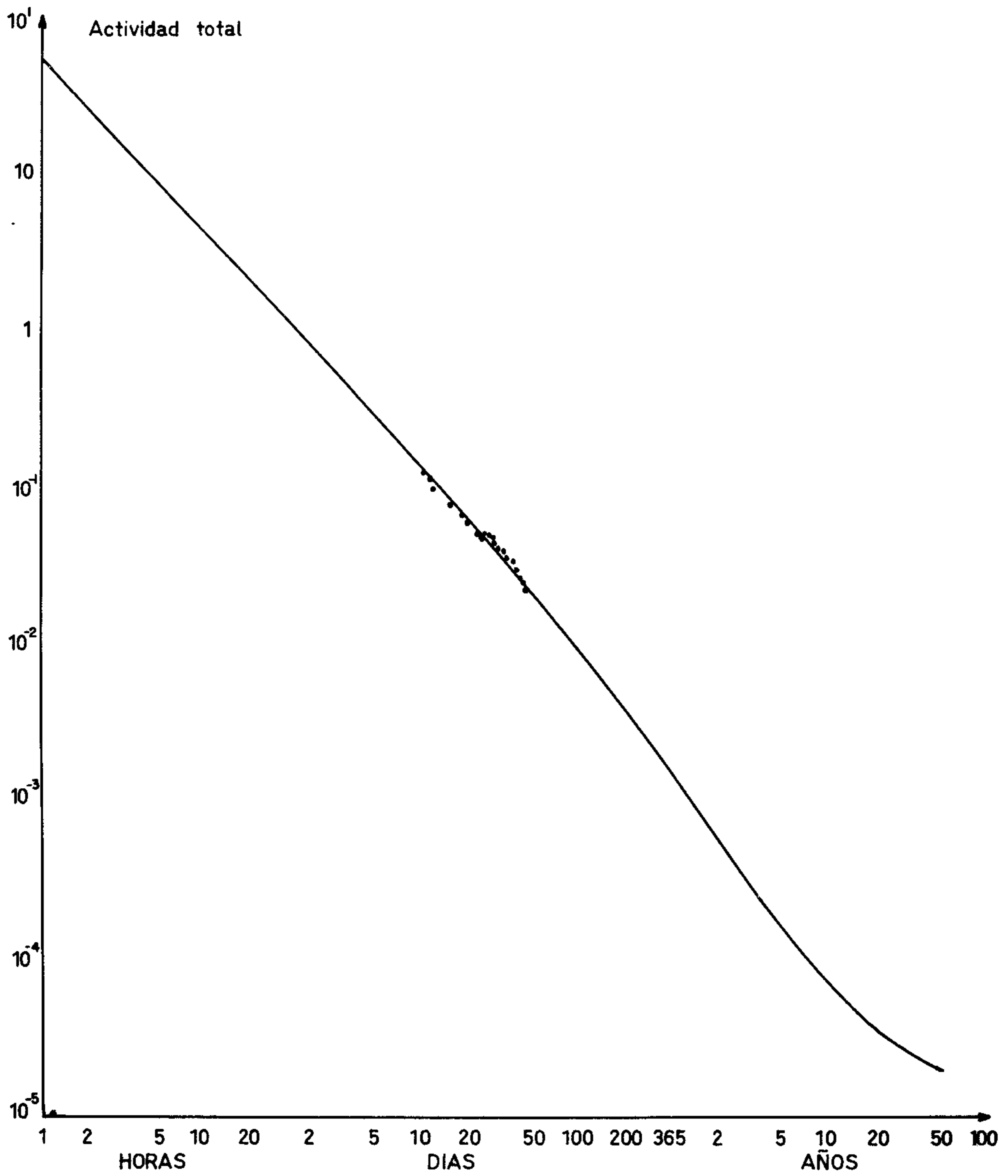
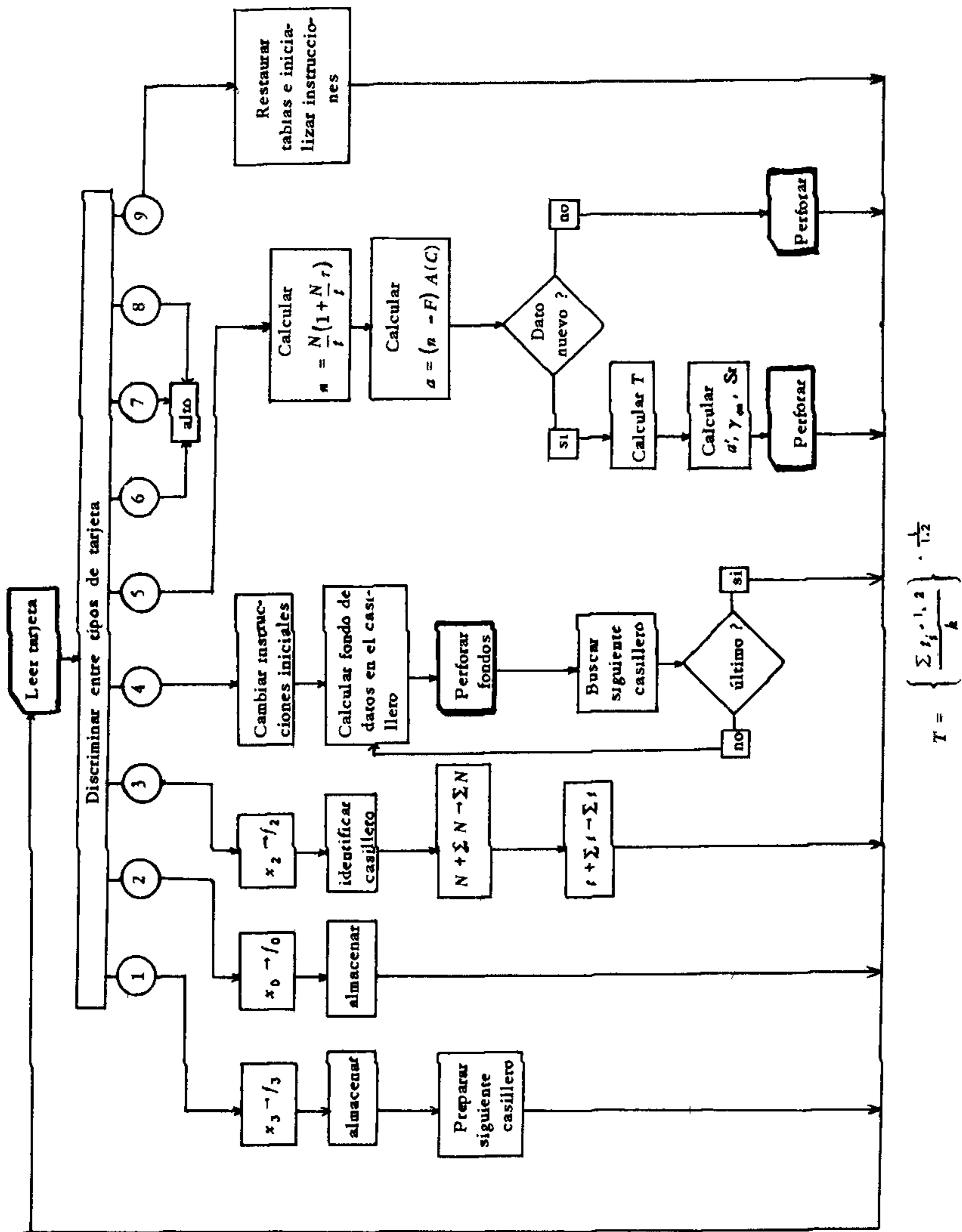


Fig. 2



$$T = \left\{ \frac{\sum f_i \cdot i \cdot 2}{k} \right\} \cdot \frac{1}{1.2}$$

Fig. 3

4.0

mC/km<sup>2</sup>

# ACTIVIDAD $\beta$

VERACRUZ NOVIEMBRE 1958.

--- Actividad contada  
— Actividad corregida

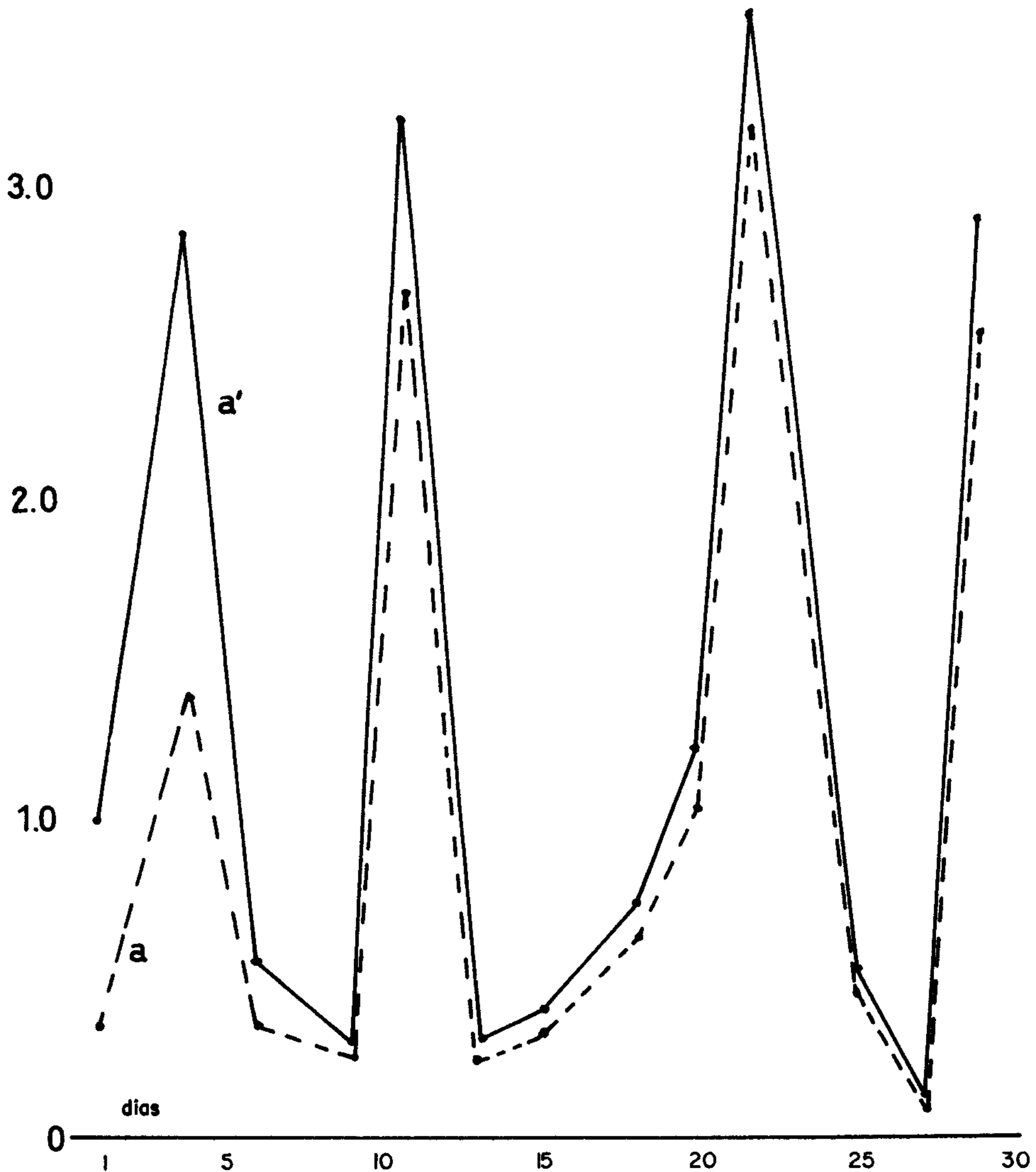


Fig. 4



# EDADES MEDIAS Y NUMERO DE EXPLOSIONES DURANTE UN MES

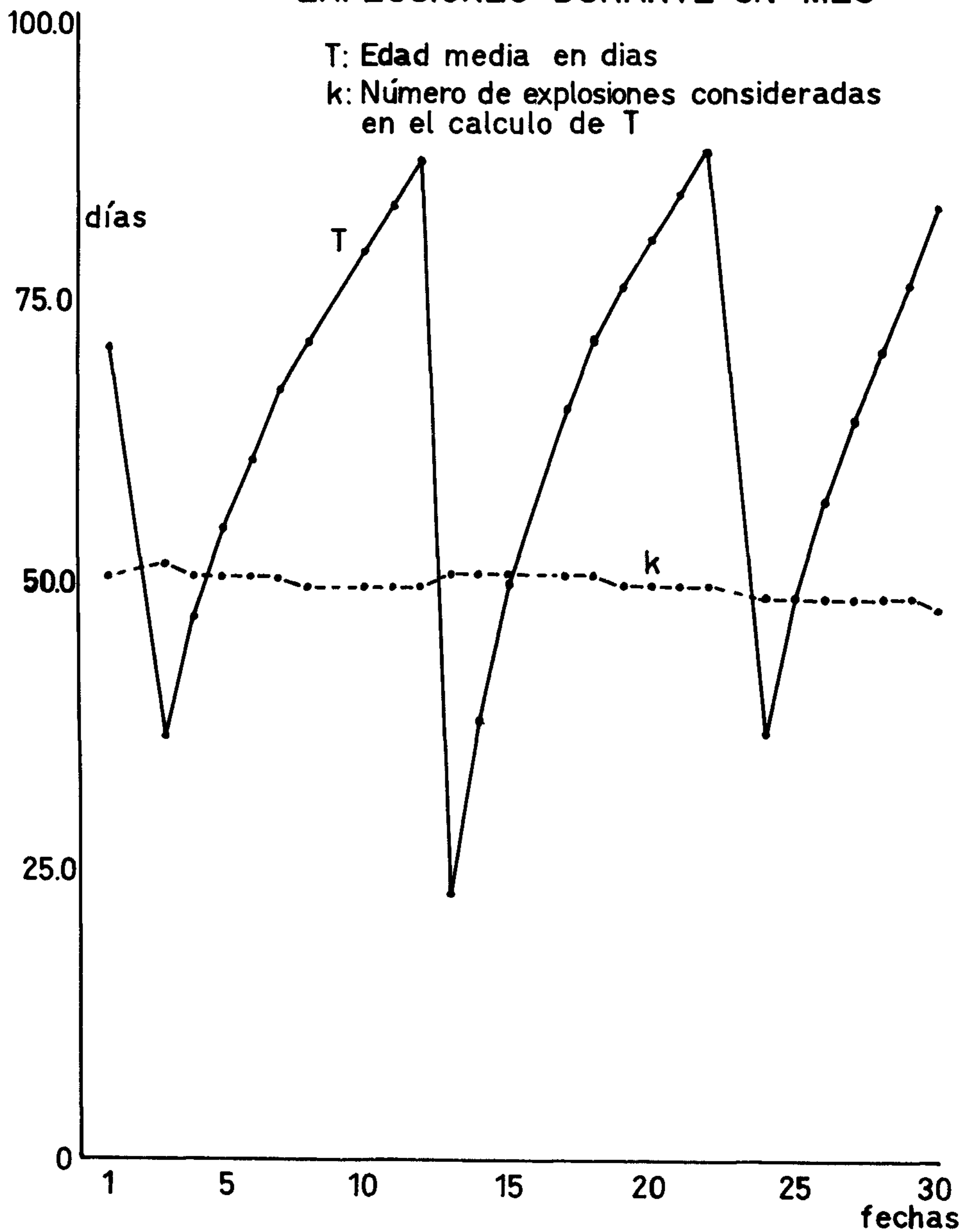


Fig. 5

