



MX0600198

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES

DIVISION DE SERVICIOS TECNICOS

CALIBRACION RELATIVA DE ACTIVIDAD CON UNA CAMARA DE IONIZACION

I.- DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA TÉCNICA Y PRIMEROS RESULTADOS  
CON LA CÁMARA 4<sup>ta</sup> METROLÓGICA ORIS-LMRI.

GERENCIA DE SEGURIDAD

DEPTO. DE METROLOGÍA DE RADIACIONES IONIZANTES  
LABORATORIO DE PATRONES RADIATIVOS

INFORMA TÉCNICO LPR-CMRI-03-90

ABRIL DE 1990.

CALIBRACION RELATIVA DE ACTIVIDAD CON UNA CAMARA DE  
IONIZACION

I.- DESCRIPCION GENERAL Y PRIMEROS RESULTADOS CON LA CAMARA  
4 $\pi$  METROLOGICA ORIS-LMRI

DR. ARIEL TEJERA RIVERA, M. EN C. ARTURO BECERRIL VILCHIS  
Y FIS. ALFONSO CORTÉS PALACIOS.

DIVISIÓN DE SEGURIDAD. ININ.

GERENCIA DE SEGURIDAD

DEPTO. DE METROLOGÍA DE RADIACIONES IONIZANTES

LABORATORIO DE PATRONES RADIACTIVOS

INFORME TÉCNICO LPR-CMRI-03-90

ABRIL DE 1990

## DESCRIPCION GENERAL DE LA TECNICA

### INTRODUCCION

Las cámaras de ionización  $4\pi\gamma$ , de pozo, son instrumentos muy convenientes para efectuar determinaciones relativas precisas de emisores  $\gamma$  puros, con menor precisión  $\beta\text{-}\gamma$ , y en algunos casos se pueden medir los emisores  $\beta$  puros. Es práctico calibrar la cámara para cada radionúclido en particular. Como control y para calibraciones de radisótopos no comprendidos en la calibración anterior es conveniente calcular una curva de eficiencias para gammas monoenergéticas.

La radiación ionizante produce una corriente en el volumen sensible de la cámara, que bajo condiciones experimentales satisfactorias, es proporcional a la actividad de la fuente.

Las actividades medidas van de algunos KBq a TBq, de acuerdo con el tipo de la cámara, la presión del gas de llenado y la energía específica emitida por la fuente. Esta amplitud de escalas es una de las ventajas importantes de las cámaras de ionización. Se usan con éxito para medir fuentes no puntuales, y en general se miden soluciones contenidas en ampollitas o en envases tipo penicilina, en los que los volúmenes varían de 1 a 10 ml. También se calibran cuerpos sólidos, como las agujas de Ra-226, o ampollas con gases radiactivos.

Una cámara de ionización es un artificio en el que la ionización causada por un haz de radiación gamma en un gas, en un volumen determinado, se colecta aplicando una diferencia de potencial entre los electrodos que definen el volumen activo. Y se mide la carga colectada, con la finalidad de relacionar la actividad del emisor gamma con la señal eléctrica.

Una cámara de pozo, ó  $4\pi\gamma$ , como la que aparece en el esquema de la fig. 1, consta de piezas cilíndricas con un eje de simetría común. La más externa es de material aislante, o si es de metal está conectada a tierra y usualmente está cubierta por una capa de material aislante; por dentro de ésta viene el electrodo cilíndrico al que se aplica el alto voltaje, conectado a su vez con otro cilindro conductor más interno, disponiéndose entre ambos el cilindro colector, que debidamente aislado, se conecta al preamplificador del electrómetro. Usualmente, con apoyo en la tapa del aislador, se dispo-

ne una canastilla que permite introducir y retirar el material radiactivo de la zona central de la cámara en la que la sensibilidad sea lo más uniforme posible. Es usual blindar la cámara en su exterior para disminuir el fondo ambiental y proteger al personal cuando las muestras son muy activas. Las dimensiones de las cámaras varían ampliamente, pero es usual que el volumen activo sea entre 1 l y 5 l. El gas de llenado puede ser desde aire a presión atmosférica hasta nitrógeno o argón a presiones que llegan a las 20 atmósferas. La medición para las bajas actividades está limitada por la corriente de fondo y las altas por la posibilidad de aplicar tensiones suficientes para saturar la corriente colectada y por la corriente de fuga en los aisladores.

### RADIACION FOTONICA

La interacción de los fotones con los electrones atómicos es de caracter aleatorio. Dependiendo de su energía, un fotón tiene una probabilidad dada de tener una interacción - fotoeléctrica, de Compton o de formación de pares, e incluso tiene una probabilidad diferente de cero de atravesar cualquier espesor de materia sin sufrir alguna interacción. En el caso de la cámara se consideran dos aspectos de la interacción de los fotones con la materia: una, correspondiente a la atenuación de la radiación por autoabsorción en el medio en el que se encuentra el material radiactivo, en las paredes del envase, en el aire que media entre el envase y las paredes internas de la cámara y en los electrodos dentro de la cámara; la otra, es la absorción de energía en el gas detector. Además, hay una fracción de la radiación que finalmente se pierde en las paredes exteriores de la cámara y prácticamente se anula en el blindaje.

El efecto de la atenuación por todo el material con el que interacciona la radiación antes de ionizar el gas detector se hace patente observando que la corriente eléctrica medida en este gas para un flujo de gammas monoenergéticas en general difiere del que se esperaría calculándola a partir de las secciones eficaces del gas. Es tan complejo el cálculo de todos los fenómenos secundarios de atenuación y absorción de energía fotónica en una cámara de pozo que hasta la fecha no se conciben como instrumentos absolutos sino que los coeficientes de calibración para los distintos radisótopos se obtienen a partir de patrones. Desde luego que la consideración de los fenómenos primarios que ocurren en el instrumento son una guía para el diseño y junto con la experiencia permiten la construcción de cámaras con especificaciones dadas de antemano.

### Atenuación fotónica.

Por la costumbre, a la radiación electromagnética producida en los núcleos atómicos se le llama radiación gamma sin que, salvo en general por su energía, difiera esencialmente de los rayos X, bremsstrahlung o dispersión Compton. Deseamos a lo largo de estas líneas llamar radiación gamma, cuando con venga, a la radiación primaria nuclear.

El coeficiente total de atenuación lineal,  $\mu_0$ , es la medida del número de fotones primarios que sufren una interacción. Este coeficiente es la suma de los siguientes coeficientes lineales de atenuación:

$\sigma = \sigma_a + \sigma_s$ : coeficiente de atenuación lineal total para el proceso Compton, en el que  $\sigma_a$  es de absorción verdadera y  $\sigma_s$  el de la deflexión de la radiación electromagnética.

$\tau$ : coeficiente de atenuación lineal por efecto fotoeléctrico.

$\kappa$ : coeficiente de atenuación por formación de pares.

$$\mu_0 = \sigma_a + \sigma_s + \tau + \kappa$$

Los valores de  $\sigma$ , aparecen en la literatura graficados o tabulados para cada material. Salvo su variación con la energía el coeficiente  $\sigma$  es proporcional a  $\rho \frac{Z}{A}$ , siendo  $\rho$  la densidad del material incidido,  $Z$  el número atómico y  $A$  el de masa.

El coeficiente  $\tau$  es proporcional a  $\rho \frac{Z^n}{A}$ , donde  $n$  es un exponente función de la energía del fotón incidente y que va de 4 para 100 KeV a 4.6 para 3 MeV, y a su vez, el coeficiente  $\kappa$  es proporcional a  $\rho \frac{Z^2}{A}$ .

La atenuación de un haz de radiación gamma por un compuesto químico o una mezcla de elementos depende de la suma de las secciones eficaces presentadas por todos los átomos en la mezcla. Debido a que las uniones químicas son de algunos eV no tienen efectos significativos en las interacciones Compton, fotoeléctricas o de formación de pares.

La atenuación de la mezcla de elementos con coeficientes  $\mu_1, \mu_2, \dots$ , respectivamente es

$$\mu/\rho = w_1\mu_1/\rho_1 + w_2\mu_2/\rho_2 + \dots$$

siendo  $\mu/\rho$  el coeficiente total de atenuación masiva, de la mezcla,  $\mu_i/\rho_i$ , el coeficiente total de atenuación masiva del

iésimo material y  $\omega_i$  la proporción masiva correspondiente.

Este hecho establece que la respuesta final de la cámara a los fotones de la muestra dependerá de las secciones eficaces de los materiales y no de las formas en que se mezclen o queden aleados.

### La muestra radiactiva

Las cámaras de pozo tienen una simetría cilíndrica y conviene colocar la muestra radiactiva, que suele tener también simetría de rotación en torno a un eje, de manera que estos ejes coincidan. La sensibilidad de la cámara se puede estudiar usando una pequeña aguja de  $Ra^{226}$ . Se encuentra que a lo largo del eje es variable, salvo para una zona donde es mínima y se aprovecha para que éste sea el lugar donde se ubiquen siempre las fuentes. Esta es la zona equisensible axial, a la que le corresponden zonas equisensibles en forma de anillos cilíndricos concéntricos, que en general aumentan en respuesta rápidamente, a medida que se alejan del eje. Dependiendo de la exactitud que se desee se limita la zona equisensible axial y radial. Si la muestra radiactiva excede a este volumen se puede hacer una calibración con un patrón que tenga la misma geometría o intentar un coeficiente de corrección a partir de las áreas equisensibles.

Los envases para las soluciones que se usan con mayor frecuencia en las cámaras de pozo son del tipo ampollita de 5 ml y 10 ml, y frascos penicilina. Los volúmenes de solución contenidos oscilan de 1 ml a 10 ml. Cada radisótopo presenta una respuesta particular, dependiendo del tipo de cámara, cuando se varía el volumen de solución sin variar la actividad. La respuesta más variable es para las energías bajas, menores de 300 KeV, como para los rayos X causados por el  $I^{125}$ , de 35 KeV, que puede variar 10% cuando el volumen contenido en un frasco tipo penicilina de 10 ml varía de 1 ml a 7 ml <sup>(1)</sup>.

Para energías fotónicas en las que predomina el efecto Compton, por ejemplo <sup>(1)</sup>, para energías comprendidas entre 325 KeV de la emisión del  $Cr^{51}$  a 1.8 MeV del  $Y^{88}$ , no se han observado cambios significativos en la respuesta electrónica para cambios en el volumen de 1 a 10 ml, usando frascos tipo penicilina.

Dalmazone <sup>(1)</sup> reporta el cálculo de un coeficiente de corrección para las medidas efectuadas con envases del material radiactivo, si son de mayor diámetro que los usados para la calibración de la cámara. Para esto visualizamos el volumen V de solución radiactiva, que ocupa un volumen verticalmente equisensible, como repartido en N cilindros concén-

tricos con el eje de la cámara, cada uno de radio  $r_i$ , grueso  $(r_i + \Delta r_i)$  y volumen  $\Delta V_i$ . Del estudio efectuado con la aguja de  $Ra^{226}$  se conoce la relación entre la respuesta de la cámara en los puntos intermedios entre  $r_i$  y  $(r_i + \Delta r_i)$ , y los  $\bar{r}$  del eje central, sea  $n_i$  esta relación. El coeficiente deseado es

$$C_s = V / \left( \sum_i^n n_i \Delta V_i \right)$$

Este coeficiente corrige el aumento de sensibilidad radial.

### Atenuación por las paredes

La radiación emitida por la solución sufre una autoabsorción, atenuación por las paredes de vidrio del envase, el aire mediante entre el envase y las paredes internas de la cámara y los cilindros metálicos de la cámara anteriores a la pared exterior.

En general es posible usar envases y soluciones para calibrar del mismo tipo y volumen que la del patrón respectivo, y salvo para las energías fotónicas muy bajas, como las emitidas por el I-125, las pequeñas diferencias en densidad de la solución o grueso de las paredes del envase no producen errores significativos.

El material de las paredes de la cámara determina radicalmente el uso que se le pueda dar; por ejemplo, una cámara de alta sensibilidad para gammas con energías en la zona Compton suele tener paredes de acero y el gas detector, como el argón, a presiones de 10 a 20 atmósferas. En cambio, una cámara que detecte satisfactoriamente un espectro de energías que incluya a las del I-125 y a la radiación de bremsstrahlung de los emisores beta puros, como el  $P^{32}$  y el  $Sr^{90}-Y^{90}$ , tiene paredes delgadas de un metal ligero, como el aluminio o una aleación ligera de aluminio.

### El gas detector

En las cámaras de pozo se ha usado principalmente como gas de llenado o detector aire a presión atmosférica y nitrógeno o argón a presiones que van desde  $1 \text{ kg/cm}^2$  a 20 atmósferas.

Cuando se ha usado aire en una cámara abierta a la atmósfera, es necesario efectuar correcciones por presión y temperatura para tomar en cuenta el cambio en la densidad del gas.

El gas que se emplea actualmente para cámaras destinadas a calibrar radisótopos emisores de fotones de baja energía, como el  $I^{125}$  o emisores beta puros, como el  $P^{32}$  o el  $Sr^{90}$ , es el argón. Este gas tiene una atenuación fotoeléctrica a 10 KeV de  $64.5 \text{ cm}^2/\text{g}$ , en cambio el nitrógeno tiene de  $3.73 \text{ cm}^2/\text{g}$  y el aire de  $4.99 \text{ cm}^2/\text{g}$ . La absorción total del argón sigue siendo mayor que la del aire y el nitrógeno hasta que la energía de los fotones se acerca a unos 300 KeV y predomina el efecto Compton.

En general se tiene que establecer un compromiso entre la presión del gas detector y el material y grueso de las paredes de la cámara, ya que la atenuación de los fotones en las paredes aumenta proporcionalmente a  $Z$  y a potencias de este parámetro, pero también la resistencia a la rotura es mayor para las aleaciones de hierro con metales pesados que las de aluminio. Por otro lado, la respuesta de la cámara es en principio proporcional a la presión del gas.

### EMISORES BETA

Es posible, por comparación, medir la actividad de emisores beta puros como el  $P^{32}$  y el  $Sr^{90}$ , midiendo la radiación de bremsstrahlung que producen las partículas beta al quedar frenadas y detenidas antes de alcanzar el volumen activo de la cámara. Los espectros beta del  $P^{32}$  y del  $Sr^{90}$  tienen respectivamente una energía máxima de 1710.4 KeV y 2284 KeV. La radiación de bremsstrahlung que producen es un espectro continuo que disminuye con la energía y es equivalente a una radiación X con energía  $\bar{E}_x = 0.16T$ , siendo  $T$  la energía máxima del espectro beta<sup>(1)</sup>, por lo que la energía de la radiación equivalente del  $P^{32}$  es de 270 KeV y la del  $Sr^{90}$  es de 365 KeV. La energía que pierden las betas por bremsstrahlung es una fracción pequeña de la energía media de las betas. Para el  $P^{32}$  la fracción es: (1) en el Al,  $8 \cdot 10^{-3}$  y en el Ar,  $1,1 \cdot 10^{-1}$ . para el  $Sr^{90}$ , las pérdidas son del orden de: en el Al,  $1,4 \cdot 10^{-3}$  y para el Ar,  $2 \cdot 10^{-2}$ . Para los materiales que se usan en las cámaras de ionización, la producción de la radiación de bremsstrahlung es del orden del 1%. Mediante la fórmula de Bethe y Heitler para calcular la pérdida de energía por bremsstrahlung se puede expresar una relación aproximada de la razón de las eficiencias de una cámara de ionización para la detección del  $P^{32}$  y del  $Sr^{90}$ . La fórmula es la siguiente:

$$S = NTZ(Z + 1) (1/137)e^2/mc^2 (4 \ln 2T/mc^2 - 4/3)$$

siendo  $N$  el número de átomos por tramo,  $T$  la energía cinética máxima del espectro beta,  $Z$  el número atómico de los áto-



mos,  $e$  y  $m$  son la carga y la masa en reposo del electrón. En igualdad de condiciones, salvo la energía cinética respectiva, la relación de  $S(P^{3/2})$  a  $S(S^{9/0})$  es de 0.6.

### MEDIDA DE LA CORRIENTE DE IONIZACION

Se acostumbra medir actualmente la corriente producida en el gas de una cámara de ionización 4 metrológica por uno de los dos métodos siguientes: ( )

- a) Método de la pendiente
- b) Método de Townsend

a).- En el primer método se considera que la cámara de ionización es equivalente a una fuente de corriente continua,  $I$ , con una capacidad  $C_i$  y una resistencia  $R_i$  en paralelo, como se ve en la figura 2. La resistencia equivalente suele ser mayor a  $10^{14} \Omega$  y la capacidad interna a algunos picofaradios. La corriente  $I$  carga al condensador  $C$ , de resistencia interna  $R$ , y produce la tensión en los bornes donde es medida como  $V$  por un electrómetro de gran impedancia de entrada ( $R > 10^{15} \Omega$  y capacidad  $C_e \sim 10^{-10} F$ ). Para un escalón de corriente  $I$  la respuesta es  $V = R'I(1 - e^{-\frac{t}{R'C}})$ , con  $1/R' = (1/R_i + 1/R_e + 1/R)$  y  $C' = C_i + C_e + C$ . Para que esta expresión se reduzca a  $V(t) = It/C'$ , prácticamente independiente de  $R'$ , es necesario que la constante de tiempo  $\tau = R'C'$  sea muy grande, lo que implica que las resistencias  $R_i$ ,  $R_e$  y  $R$  y la capacidad  $C$  sean muy elevadas; pero esto tiene el inconveniente de que la integración de la corriente se efectúa no sólo en el condensador apropiado  $C$ , sino también, en las capacidades parásitas  $C_i$  y  $C_e$ , que en general no son despreciables frente a  $C$ , lo que provoca una incertidumbre sistemática. Además el campo eléctrico en el interior de la cámara varía por el potencial  $V(t)$ , lo que puede originar errores en cámaras con paredes de aire y de extrapolación. Estos inconvenientes se reducen con un montaje como el equivalente de la figura No. 3 en el que  $1/R' = 1/R + [1/R_i (1 + A)] + [1/R_e (1 + A)]$  y  $C' = C + [C_i/(1 + A)] + [C_e/(1 + A)]$ . Se tiene que para  $A \gg 1$  las resistencias  $R_i$  y  $R_e$  aumentan considerablemente de valor, y las capacidades  $C_i$  y  $C_e$  se reducen a su vez. Por otro lado la tensión  $V_e$  del electrodo de medida de la cámara es muy bajo:  $V_e = V/A$ . Se puede calcular que hasta términos de segundo orden el potencial de salida es, para  $I(t)$  en escalón.  $V(t) = - (It/C) + [1 - (C_i + C_e)/AC] \cdot (1 - t/2RC)$ . Las cantidades entre paréntesis representan las correcciones de capacidad parásita y de no linealidad temporal, que pueden reducirse a partes en mil si  $A > 10^4$  y el condensador  $C$  es de gran capacidad y muy alta resistencia. Salvo términos correctivos que en la práctica pueden valer -

menos de  $5 \times 10^{-4}$ , el valor de la corriente  $I$  es  $I = C\Delta V/\Delta t$ .

La figura No. 4 corresponde a una realización del método descrito<sup>(4)</sup>, con un electrómetro de condensador en vibración, impedancia de entrada  $> 10^{16} \Omega$ , ruido de fondo  $\sim 10^{-17}$  A, y ganancia  $A \sim 4 \times 10^4$ . El voltmetro digital tiene una escala hasta 10 Volts y una impedancia de entrada de  $2 \times 10^{10} \Omega$ . El condensador  $C$  de integración está protegido contra la radiación y contra toda influencia electrostática. La salida  $V$  se calcula a diferentes tiempos (ver figura No. 5). Automáticamente se hacen las correcciones de presión y temperatura y se ajustan los datos de voltaje de salida del electrómetro contra el tiempo (unas 200 veces, con  $t = 20$  ms) calculando así la pendiente de la rampa, y de este valor se calcula  $I$ . Las incertidumbres aleatorias de la medida de la corriente es mejor que una milésima para corriente mayores que  $10^{-14}$  A.

b).- En el método de Townsend la corriente  $I$  de la cámara de ionización produce una carga en el condensador  $C$  que es anulado por una corriente opuesta alimentada por un generador con lo que se mantiene nula la tensión  $V$  en el electrodo de medición de la cámara. El electrómetro se usa como detector de ceros. Teóricamente no hay fuga alguna en  $C_i$ ,  $R_i$ ,  $C_e$  y  $R_e$ . El montaje óptimo es el de la figura No. 7. El voltaje de compensación es producido por medio de un potenciómetro de precisión alimentado con corriente constante por un generador patrón. La diferencia de potencial entre  $E$  y  $S$  es nula. Este voltaje es, hasta términos de segundo orden,  $U(t) = (It/C) (1 - t/2RC)$ . Esta expresión es del mismo tipo que en el caso del método de la pendiente, pero no aparecen los términos de corrección de las capacidades parásitas  $C_i$  y  $C_e$ . El factor que hay que corregir es temporal, para que este sea muy chico es necesario que la capacidad  $C$  y su resistencia interna  $R$  sean muy grandes. Salvo este término, se calcula que la corriente  $I$  es igual a  $I = C\Delta U/\Delta t$ .

## FUNCIONAMIENTO

### Calibración

Un problema que presentan las cámaras de ionización es que la respuesta para la radiación es global, es decir que no se puede discriminar selectivamente las respuestas referentes a diferentes energías, si éstas inciden simultáneamente en el volumen activo. Esta es una razón para calibrar las cámaras, si es posible, con emisores gamma monoenergéticos y por tanteos completar la curva de respuesta con emisores gamma de rendimientos conocidos.

Para obtener los coeficientes de calibración y poder usarlos, es necesario que tanto los radisótopos estandarizados como las soluciones por calibrar, estén contenidos en envases con la misma geometría y la misma cantidad. En nuestro caso se emplean soluciones patrón de 5 ml contenidas en ampolletas de vidrio de 10 ml. Las soluciones problema se contienen en ampolletas iguales a las de los patrones.

El coeficiente de calibración se define como la razón de la actividad obtenida por un método absoluto respecto a la tensión o corriente medida. Para tener una calibración para toda la gama de actividades por medir, es necesario que la corriente de ionización sea estrictamente proporcional a la actividad de las fuentes. Una condición para que se cumpla es que la corriente esté saturada y que la respuesta del sistema de amplificación sea estrictamente proporcional a la corriente producida por la cámara. Como es posible que se presenten derivas en la amplificación, conviene comparar las lecturas de los radisótopos contra la obtenida de un testigo de vida media larga, como puede ser el  $Ra^{226}$ , y efectuar una corrección de acuerdo con las alteraciones que presenten las lecturas de éste utilizando un coeficiente de fidelidad.

Cálculo de los errores.

El cálculo de los errores comprende tres aspectos: los errores relacionados con la calibración de la cámara, los errores asociados al coeficiente de fidelidad y los errores de medida para la fuente que se calibre. Estos errores se agrupan en dos tipos, los errores propiamente estadísticos y los sistemáticos.

La expresión del error relativo de la actividad medida es

$$\frac{dA}{A} = \pm \left\{ C \left[ \left( \frac{\sigma_I}{I} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_F}{F} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_P}{P} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{dAP}{Ap} + \frac{d\ell}{\ell} + \frac{dr}{r} \right\}$$

donde

$\sigma_I^2$ ,  $\sigma_F^2$  y  $\sigma_P^2$  son las varianzas asociadas con las medidas de las corrientes producidas por la fuente a calibrar, I, por la fuente de  $Ra^{226}$  que conserva la fidelidad, F, y por la fuente patrón, P.

C es el coeficiente determinado por el intervalo de confianza

$(dAP/Ap)$  es el error del patrón reportado en el certificado.

( $d\ell/\ell$ ) es el error de linealidad

( $dr/r$ ) es el error asociado a las correcciones necesarias si la forma geométrica de la fuente por calibrar y/o los materiales que atenúan sus radiaciones, son diferentes que los del patrón. Si los errores sistemáticos son pequeños, se le llama incertidumbre a la suma cuadrática del conjunto total de errores.

#### PRIMEROS RESULTADOS CON LA CAMARA $4\pi\gamma$ METROLOGICA ORIS-LMRI.

La cámara de ionización de pozo del Laboratorio de Patrones Radiactivos del Centro de Metrología de Radiaciones Ionizantes es marca ORIS, modelo MN402. En la fig. 1 aparece un esquema. El diámetro externo es de 520 mm. El pozo tiene un diámetro de 70 mm y está abierto en ambos extremos. La parte metálica es de aluminio inoxidable y el argón del volumen activo está a una presión de 1 kg/cm<sup>2</sup>. El diseño da una dinámica de medida desde 1  $\mu$ Ci hasta 2 Ci de Cs-137. Es posible medir emisores beta puros, como el P<sup>32</sup> y el Sr<sup>90</sup>. La tensión máxima aplicable es de 2000 volts, con una respuesta lineal del 5% entre 60 KeV y 2 MeV. Los aisladores son de poliuretano. El volumen del pozo en el que se tiene igual respuesta es de  $\pm$  2.5 cm respecto al centro de la cámara. La pared de la cámara es de 1.8 mm y la del electrodo colector es de 1.2 mm. La fuente de tensión es una batería de 324 V. El electrómetro es un Keithley 617 programable con un intervalo de amplificación de carga de  $10^{-15}$  C a  $20 \times 10^{-9}$  C. El fondo de la cámara depende de la humedad y es del orden de  $10^{-15}$  A. El sistema de lecturas automáticas es de marca Stadu P y permite tomar lecturas repetidas<sup>(6)</sup>.

Tabla 1.- RESPUESTA DE LA CAMARA DE IONIZACION  $4\pi\gamma$ MN402

| <u>Radisótopo</u> | <u>A x 10<sup>-15</sup>/<math>\mu</math>Ci</u> | <u><math>\pm</math> %</u> |
|-------------------|--|---------------------------|
| Na-22             | 62.48  | 1.5                       |
| P-32              | 0.45   | 2.5                       |
| Mn-54             | 23.37  | 1.0                       |
| Co-60             | 67.38  | 1.5                       |
| Zn-65             | 15.72  | 2.0                       |
| Se-75             | 16.71  | 2.5                       |
| Y-88              | 68.65  | 1.5                       |
| I-125             | 22.71  | 3.0                       |
| I-131             | 13.55  | 2.0                       |
| Ba-133            | 37.09  | 1.5                       |
| Cs-137            | 17.49  | 1.5                       |
| Ra-226            | 35.86  | 3.0                       |
| Sr-90             | 1.03   | 1.5                       |
| Cs-134            | 14.44  | 1.0                       |

La repetición automática de las lecturas se logra gracias a los siguientes componentes: una interfase IEE-488; - una microcomputadora STADU-P, una tarjeta de tiempo Pro Clock y una impresora Imagewriter. El programa está elaborado en lenguaje Basic y va desde la adquisición repetida de la corriente medida hasta la impresión del promedio pesado de las pendientes y su error asociado, calculando la recta por medio de mínimos cuadrados; corrige el valor de la pendiente de carga llevándolo a las 12 horas tiempo universal del día de la medida. Calcula el promedio pesado de la corriente y el error asociado a ella; calcula el valor de la actividad de la fuente y la incertidumbre global asociada a ella. La incertidumbre global se calcula por la suma cuadrática del conjunto de errores sistemáticos y aleatorios.

En la tabla 1 está la lista de los resultados de medir patrones fabricados por el L.M.R.I., Francia, y presentados en 5 ml de solución contenidos en ampolletas selladas de 10 ml.

#### Respuesta axial y radial

Para determinar la zona de mínima variación en la respuesta de la cámara cuando se desplaza una fuente radiactiva a lo largo del eje de la cámara, se tomaron lecturas con una minúscula aguja de  $Ra^{226}$  arriba y abajo de un punto situado a 33.9 del borde superior del pozo. Los resultados aparecen en la fig. 9.a. Las abscisas se refieren a la distancia en la que se colocó la aguja radiactiva respecto al punto cero mencionado y las ordenadas corresponden al porcentaje en que varía la lectura respecto a la zona equisensible. Se observa que la zona equisensible abarca unos 5 cm en los que la disminución de la señal no es mayor al 0.1%.

En las figs. 9b y 9c aparecen los valores correspondientes al porcentaje de aumento de la respuesta cuando se toman lecturas con la aguja de radio alejada hasta 15 mm del eje. La gráfica 9b corresponde a lecturas en el plano que pasa por el punto 1.03 cm del eje, y la gráfica 9c al plano que pasa por el punto 3.12 cm del eje. En estas gráficas las abscisas corresponden al alejamiento respecto al eje, las ordenadas son los porcentajes de desviación. Se observa que este es de 2.3% para 15 mm de excentricidad.

#### Curva de eficiencia

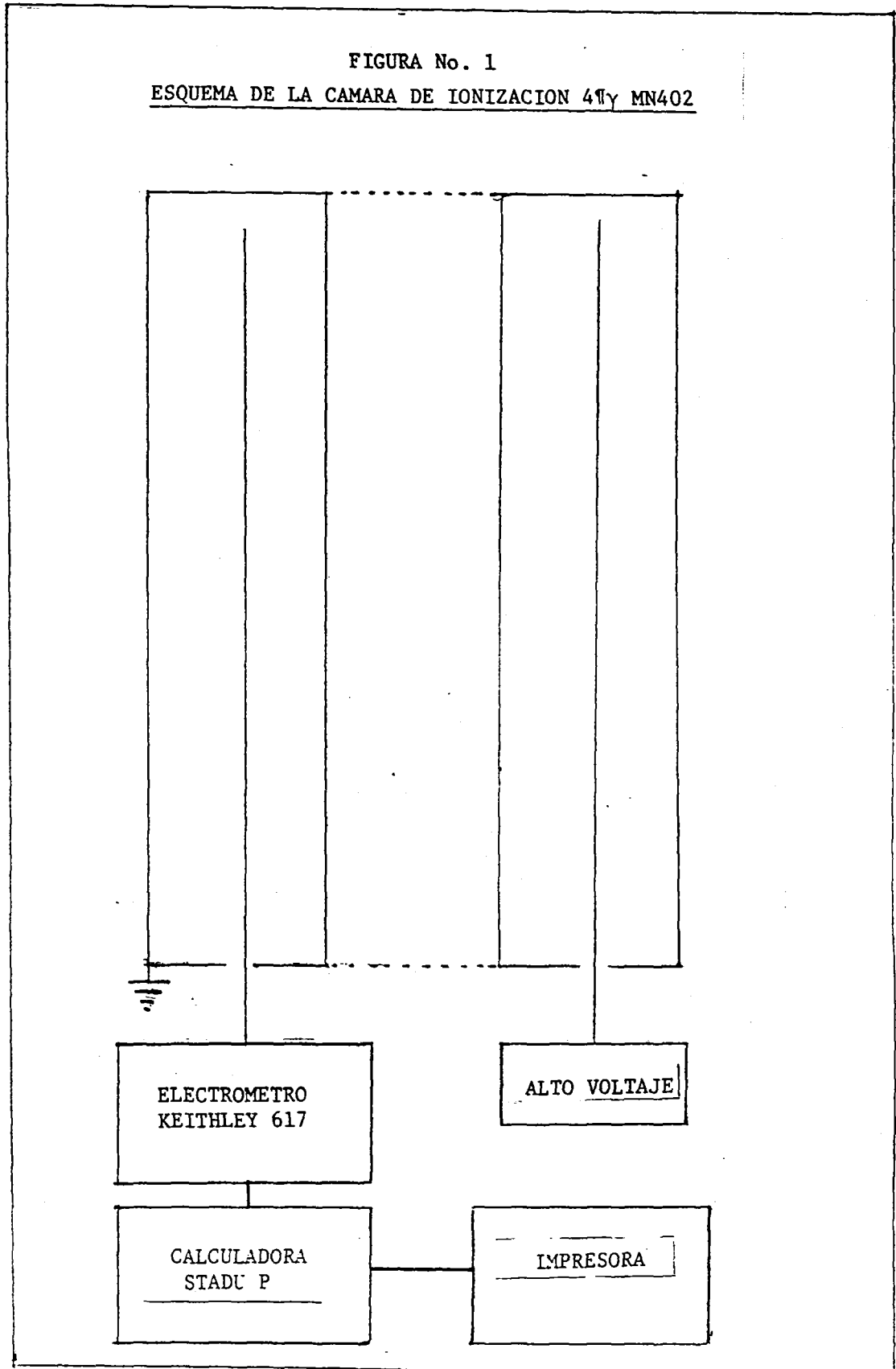
Se trazó la curva de eficiencia para los fotones monoenergéticos en la región donde es preponderante el efecto Compton. Los puntos numerados en la gráfica de la fig. 10 son

los siguientes:

| Punto | Radisótopo        | Energía (KeV) |
|-------|-------------------|---------------|
| 1     | Cs <sup>134</sup> | 569.32        |
| 2     | Cs <sup>134</sup> | 604.69        |
| 3     | Cs <sup>137</sup> | 661.66        |
| 4     | Cs <sup>134</sup> | 795.84        |
| 5     | Co <sup>134</sup> | 801.93        |
| 6     | Mn <sup>54</sup>  | 834.84        |
| 7     | Y <sup>88</sup>   | 898.04        |
| 8     | Zn <sup>65</sup>  | 1115.52       |
| 9     | Co <sup>60</sup>  | 1173.24       |
| 10    | Co <sup>60</sup>  | 1332.50       |
| 11    | Y <sup>88</sup>   | 1836.06       |

En coordenadas log-log la curva es ligeramente conve  
xa hacia arriba.

FIGURA No. 1  
ESQUEMA DE LA CAMARA DE IONIZACION 4πy MN402



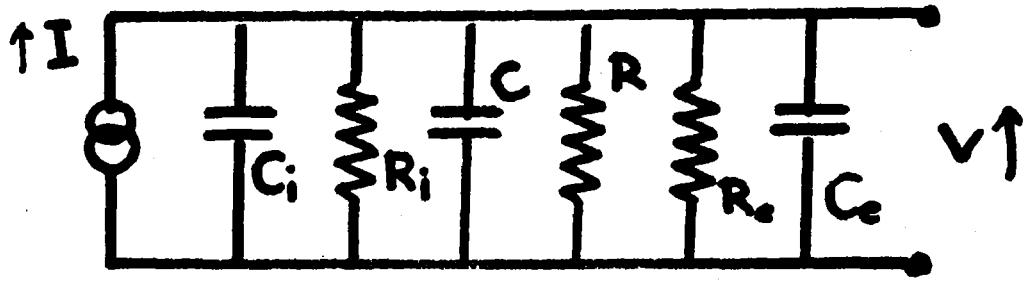


Fig. 2

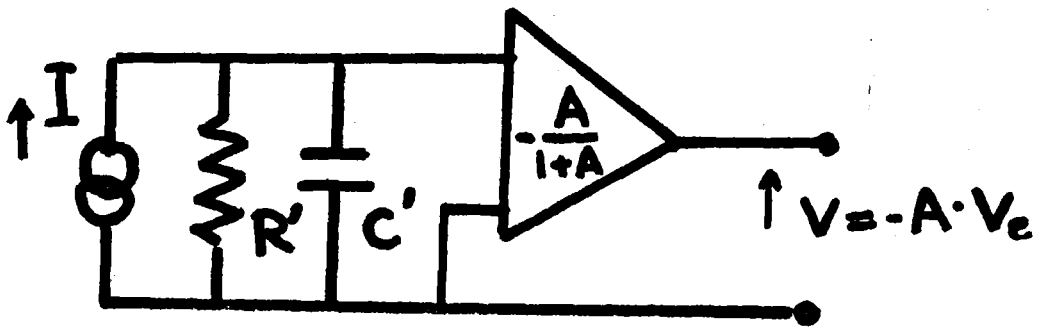


Fig. 3

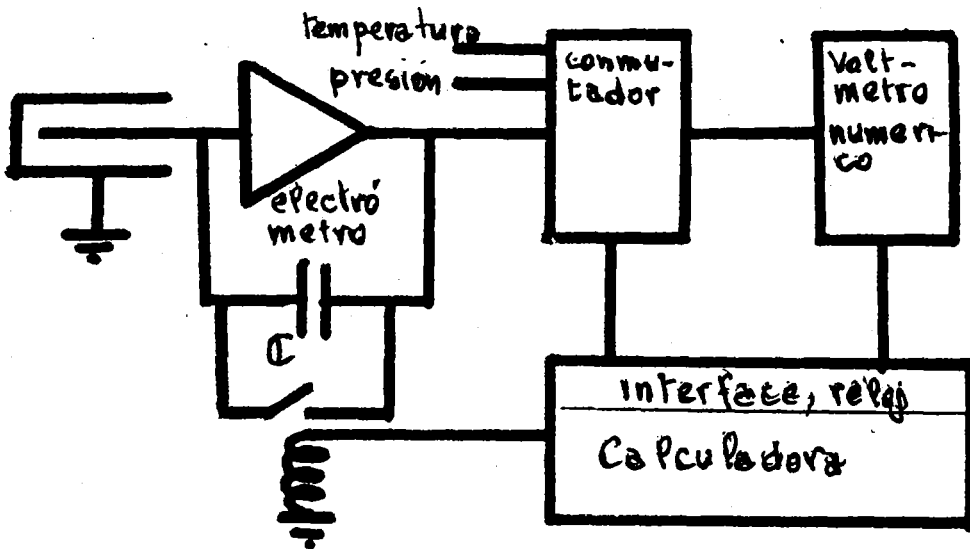
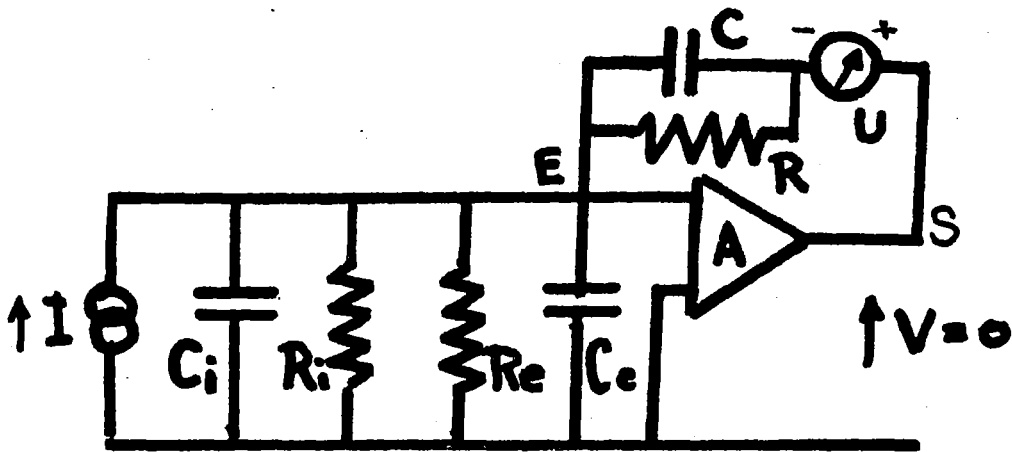
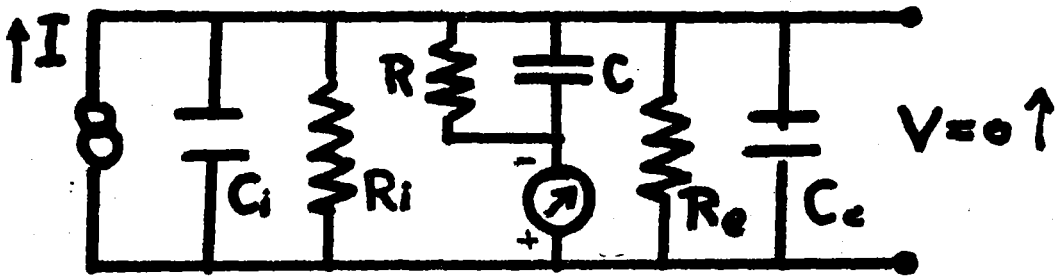
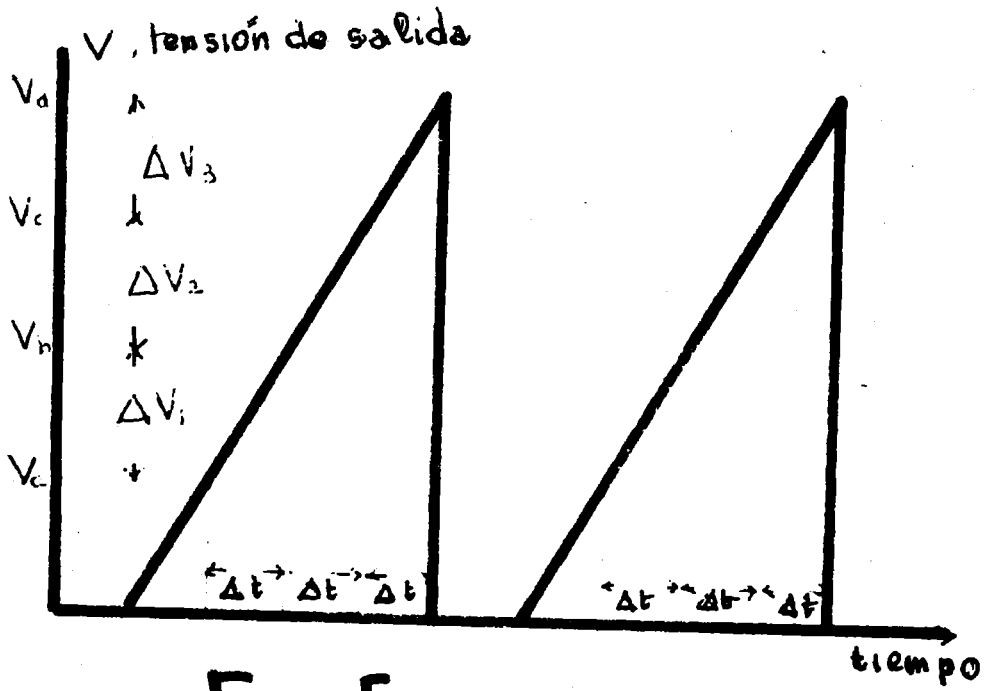


Fig. 4.





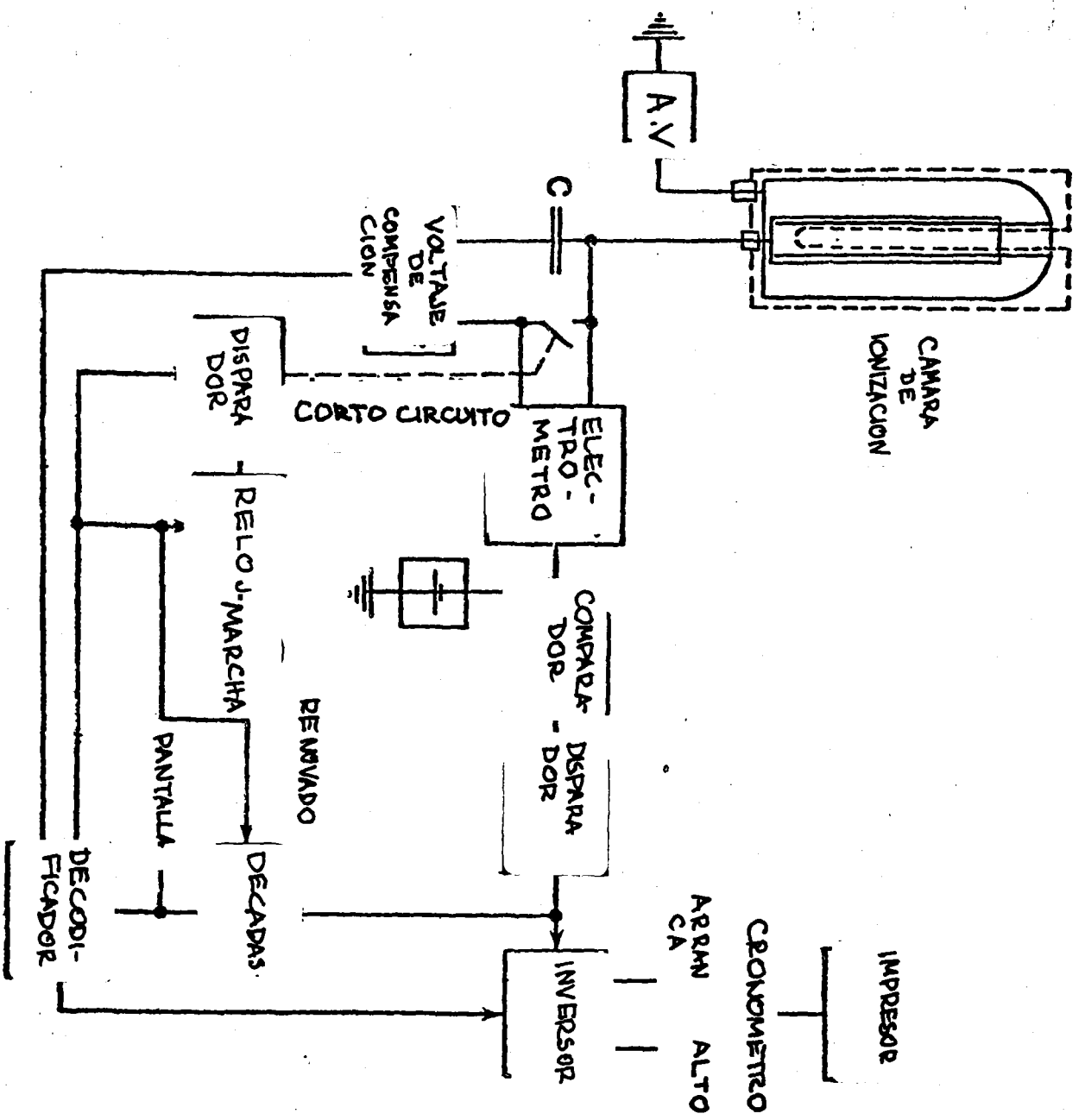
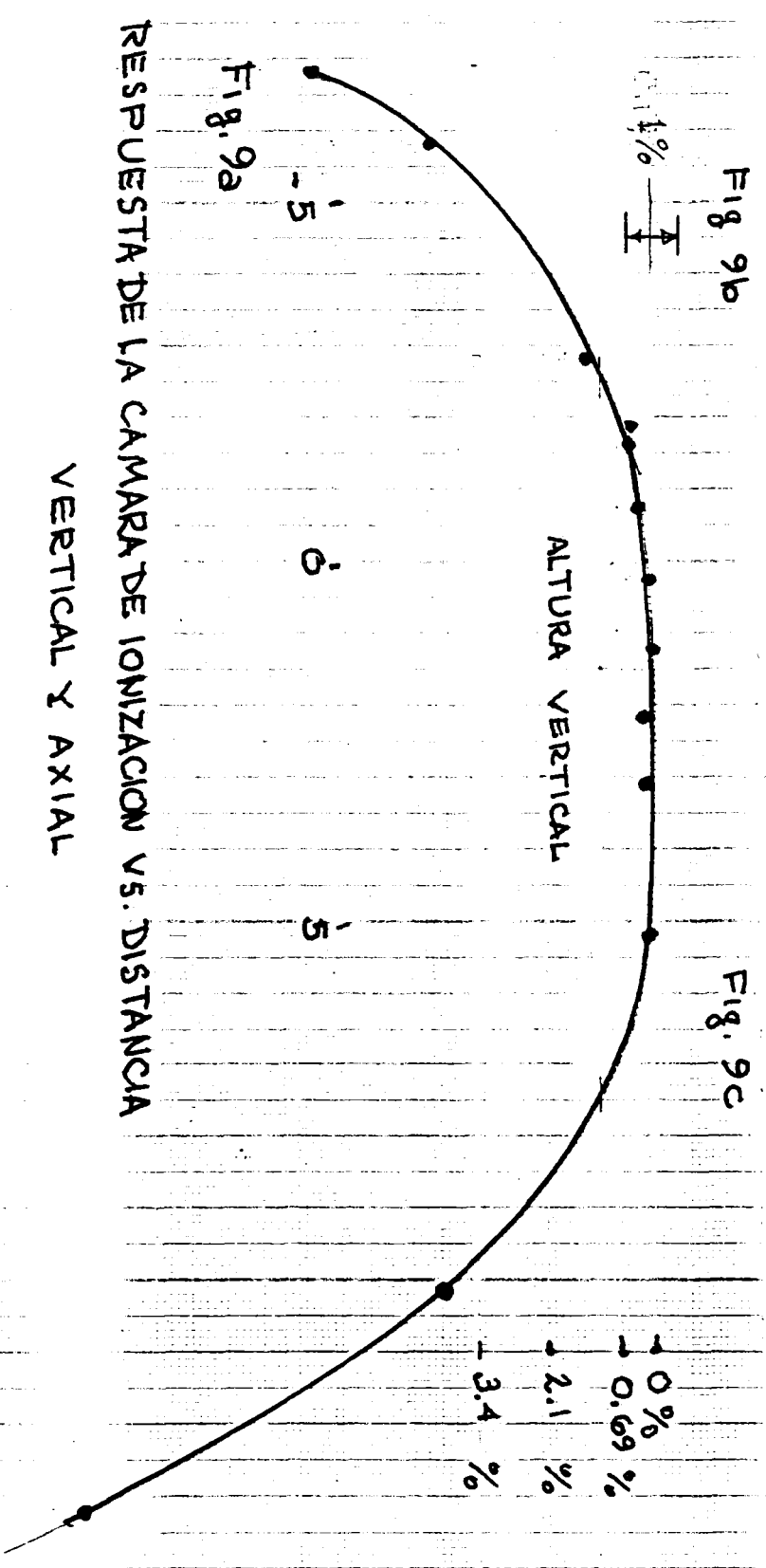
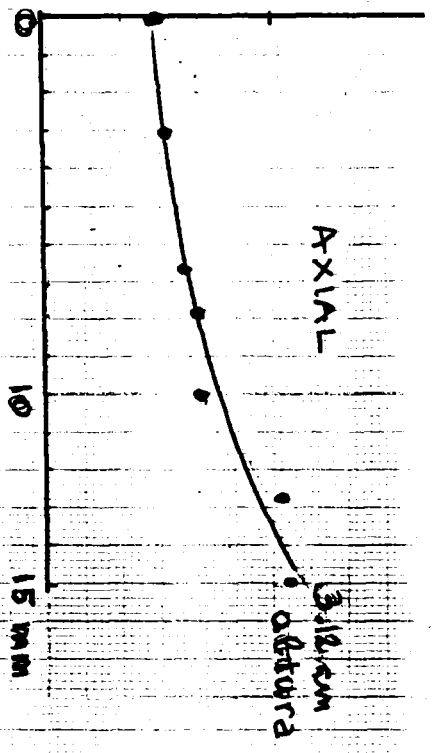
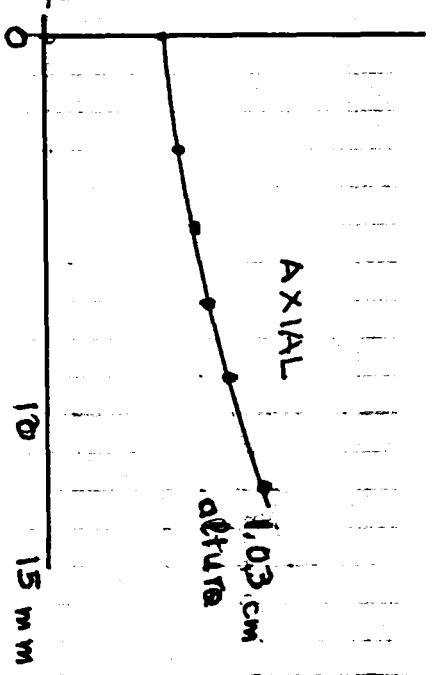
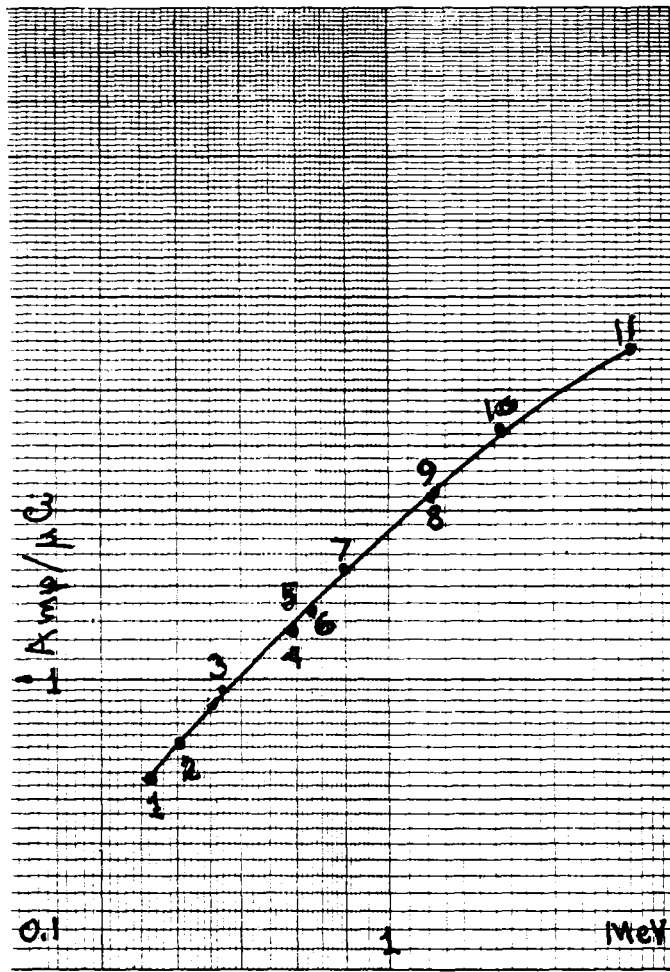


Figura No. 8



RESPUESTA DE LA CAMARA DE IONIZACION V.S. DISTANCIA VERTICAL Y AXIAL



- |                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| 1 - Cs <sup>134</sup> | 6 - Mn <sup>54</sup>  |
| 2 - Cs <sup>134</sup> | 7 - Y <sup>88</sup>   |
| 3 - Cs <sup>137</sup> | 8 - Co <sup>60</sup>  |
| 4 - Cs <sup>134</sup> | 9 - Zn <sup>65</sup>  |
| 5 - Cs <sup>134</sup> | 10 - Co <sup>60</sup> |
|                       | 11 - Y <sup>88</sup>  |

Fig. 10