

09.70.10

|                        |             |
|------------------------|-------------|
| C. N. E. A. Biblioteca |             |
| ARCHIVO PUBLICACIONES  |             |
| Nº<br>1                | AÑO<br>1970 |

**COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
REPUBLICA ARGENTINA**

**EQUIPOS NUCLEARES DE MEDICION Y CONTROL EN HIDROLOGIA**

**Antonio C. Castagnet**

**APLICACION DE RADIOISOTOPOS EN HIDROLOGIA  
6to CURSO REGIONAL**

**San Juan, 13 de octubre al 20 de noviembre de 1970**

## **CONTENIDO**

|                |                                                                                                       |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1.0.0</b>   | <b>EQUIPOS NUCLEARES DE MEDICION Y CONTROL EN HIDROLOGIA</b>                                          |
| <b>1.1.0</b>   | <b>Radiación electromagnética</b>                                                                     |
| <b>1.1.1</b>   | <b>Atenuación</b>                                                                                     |
| <b>1.1.1.1</b> | <b>Medición de espesor y densidad superficial</b>                                                     |
| <b>1.1.1.2</b> | <b>Radiografía industrial</b>                                                                         |
| <b>1.1.1.3</b> | <b>Medición de densidad: aplicación al diseño de densitómetros o turbidí-<br/>metros y nivómetros</b> |
| <b>1.1.1.4</b> | <b>Medición de nivel y densidad simultáneo. Aplicación en nivometría.</b>                             |
| <b>1.1.1.5</b> | <b>Medición de concentración. Aplicación a estudios de contaminación de<br/>aguas.</b>                |
| <b>1.1.2</b>   | <b>Retrodispersión</b>                                                                                |
| <b>1.1.2.1</b> | <b>Medición de espesor</b>                                                                            |
| <b>1.1.2.2</b> | <b>Medición de densidad de suelos</b>                                                                 |
| <b>1.1.3</b>   | <b>Fluorescencia de rayos X (FRX)</b>                                                                 |
| <b>1.1.3.1</b> | <b>Medición de concentración</b>                                                                      |
| <b>1.2.0</b>   | <b>Uso de partículas cargadas</b>                                                                     |
| <b>1.2.1</b>   | <b>Atenuación</b>                                                                                     |
| <b>1.2.1.1</b> | <b>Medición de densidad</b>                                                                           |
| <b>1.2.2</b>   | <b>Retrodispersión beta</b>                                                                           |
| <b>1.2.2.1</b> | <b>Medición de concentración</b>                                                                      |
| <b>1.3.0</b>   | <b>Uso de neutrones</b>                                                                               |
| <b>1.3.1</b>   | <b>Fuentes de neutrones</b>                                                                           |
| <b>1.3.2</b>   | <b>Dispersión y captura</b>                                                                           |
| <b>1.3.2.1</b> | <b>Medición de concentración por moderación (perfilaje neutrón-neutrón<br/>y neutrón-gamma)</b>       |
| <b>1.3.2.2</b> | <b>Medición de concentración por dispersión inelástica y captura</b>                                  |
| <b>1.3.2.3</b> | <b>Medición de concentración por distribución de los neutrones en el<br/>tiempo.</b>                  |

**Nota:** Figuras al final del texto.

### **1.0.0 EQUIPOS NUCLEARES DE MEDICION Y CONTROL EN HIDROLOGIA**

Al exponer un material a un haz de radiaciones nucleares ocurren en general, los siguientes efectos:

- parte de la radiación lo atraviesa en la dirección del haz incidente;
- parte se dispersa en su interior y emerge en cualquier dirección;
- parte de la energía es absorbida pudiendo ser re-emitida como radiación secundaria.

Estos efectos dependen del tipo y energía de la radiación primaria y de las características físicas y químicas del material irradiado.

Eligiendo la fuente radiactiva y permaneciendo fijos determinados parámetros del material, cualquiera de los efectos descritos se puede utilizar para la medición o análisis del resto de las variables que caracterizan al material o a los procesos donde este evoluciona (espesor, densidad, nivel, interfase, composición química, etc).

Este es en líneas generales, el principio de funcionamiento de los así llamados equipos nucleares de medición y control.

Tales equipos consisten fundamentalmente, en un sistema de irradiación compuesto por una o más fuentes encapsuladas y un sistema de detección que puede también estar formado por uno o más detectores.

La disposición geométrica de ambos sistemas y los tipos de fuentes y detectores que los integran se eligen de acuerdo a los propósitos de la medición.

Con excepción de los equipos para radiografía industrial, la señal entregada por los detectores se procesa electrónicamente ya sea para relacionarla con el parámetro medido y expresarla en sus mismas unidades, o para la automatización del proceso o para ambos fines a la vez.

Para describir los diferentes equipos se los puede clasificar por el tipo de radiación utilizada y, dentro de cada radiación, por el proceso de interacción en que se basa su funcionamiento.

Se ha considerado conveniente incluir en esta descripción algunas breves referencias sobre equipos que si bien no tienen aplicación directa en hidrología pueden tenerla en problemas asociados con ingeniería hidráulica.

## 1.1.0 RADIACION ELECTROMAGNETICA

### 1.1.1 Atenuación

Si un haz focalizado de  $n_0$  fotones por segundo de energía  $E$  (MeV) inciden sobre una de las caras de un material de espesor  $X$  (cm), el número  $n$  de fotones emergentes en la misma dirección por la cara opuesta será:

$$n = n_0 e^{-ux} \quad \text{fotones/s} \quad (1.1)$$

donde:

$u$ , coeficiente total de atenuación lineal ( $\text{cm}^{-1}$ ).

El coeficiente lineal  $u$  depende de la densidad y composición química del material irradiado y de la energía de los fotones incidentes.

La detección y medición en condiciones apropiadas del número de fotones transmitidos a través de un medio permite entonces determinaciones cuantitativas de masa (en términos de espesor, densidad o nivel) y de composición química (concentración de un elemento en un compuesto).

**1.1.1.1 Medición de espesor y densidad superficial.** Cuando la densidad y composición química del material son constantes, el número de fotones medidos a través del material en una geometría fija, será solamente función de su espesor y la ec. (1.1) permite calcular los datos para el diseño de los equipos en cada caso particular.

En ingeniería hidráulica la medición de espesor se puede aplicar para la inspección de las paredes de tuberías. Los equipos radioisotópicos tienen la ventaja de que son portátiles y permiten efectuar la medición en planta, sin necesidad de detener el proceso ni desarmar las cañerías.

En uno de los modelos comerciales existentes la unidad de medición es una estructura de tipo "C" (fig. 1). Uno de los extremos de la "C" tiene la fuente radiactiva (unos 300 uc de  $^{137}\text{Cs}$ ) y el otro el detector (generalmente un tubo G.M.). La estructura está diseñada de tal forma que al apoyarla sobre la superficie exterior del caño, se obtiene una geometría de medición constante, independiente del diámetro de la tubería.

La unidad electrónica auxiliar es transistorizada y alimentada por baterías con lo cual todo el equipo resulta portátil.

La lectura se corrige en función del diámetro y del fluido que circula, mediante un factor de calibración obtenido experimentalmente.

1.1.1.2 Radiografía industrial. Es sin duda la técnica radioisotópica más difundida y por lo tanto más conocida. Los equipos de radiografía industrial con radioisótopos o equipos de gammagrafía, como se los denomina usualmente, sirven para idénticos propósitos que los aparatos de rayos X, es decir, para la inspección no destructiva de soldaduras y piezas fundidas.

La fuente o pastilla radiactiva está normalmente alojada en el centro de un "container" dimensionado de acuerdo a las normas de protección contra las radiaciones.

Las radiografías pueden obtenerse ya sea mediante una exposición focalizada o una exposición panorámica. En el primer caso se aprovecha solamente un cono o ángulo sólido reducido de radiación, abriendo la tapa del container. En el segundo la fuente se saca totalmente afuera del container y la irradiación abarca prácticamente todo el espacio o un ángulo sólido de  $4 \pi$  sterorradian. Cuando la fuente es muy activa, esta última operación se ejecuta mediante un mecanismo de comando a distancia.

Las ventajas de la gammagrafía respecto a los rayos X son:

- 1) no se requieren ni energía eléctrica ni sistemas de enfriamiento, de modo que es fácil de utilizar en campaña;
- 2) las reducidas dimensiones de la fuente permiten ubicarla en lugares de difícil acceso;
- 3) el alto poder de penetración de la radiación gamma posibilita obtener buenas radiografías en piezas de gran espesor.

En general las técnicas de gammagrafía son complementarias de otros métodos existentes de inspección no destructiva, tales como rayos X, ultrasonido, magnaflex, etc.

1.1.1.3 Medición de densidad: aplicación al diseño de densitómetros o turbidímetros y nivómetros. La ec. (1.1) se puede escribir en la forma

$$n = n_0 e^{-\frac{u}{p}} \times p \quad \text{fotones/s} \quad (1.2)$$

donde

$p$  : densidad del medio absorbente ( $\text{g/cm}^3$ )

El término

$$u' = \frac{u}{p} \quad (\text{cm}^2/\text{g}) \quad (1.3)$$

se denomina coeficiente másico de atenuación total, y para valores intermedios de energía gamma, es prácticamente independiente de la composición química del absorbente, excepto variaciones en la concentración de hidrógeno.

En consecuencia la ec. (1.2) permite determinar la densidad, midiendo la atenuación de fotones a través de un espesor constante del medio examinado.

Este es el principio físico en que se basan los densitómetros o turbidímetros utilizados para medir la concentración de sedimentos en agua.

Los equipos consisten generalmente en una sonda sumergible, con forma de herradura, una de cuyas ramas contiene la fuente radiactiva y la otra el detector, espaciados ambos a una distancia  $x$  constante.

Durante las mediciones, el agua con el sedimento en suspensión circula por la abertura de la sonda, provocando una atenuación de la radiación detectada que será función de la densidad de la mezcla agua/sedimento.

El instrumento se puede diseñar y calibrar para medir pequeñas variaciones en la concentración de sedimentos, equivalentes a cambios de densidad del orden de  $0,001 \text{ g/cm}^3$ .

Si  $\pm \Delta p$  representa una variación pequeña de densidad, se tendrá

$$\frac{\Delta n}{\Delta p} = \pm n_0 u' x e^{-u' x p} \quad (1.4)$$

La relación entre la variación  $\Delta n$  de señal y un cambio relativo de densidad  $\Delta p/p$  será:

$$\frac{\Delta n}{\Delta p/p} = \pm n_0 u' x p e^{-u' x p} \quad (1.5)$$

La ec. (1.5) define la sensibilidad  $S$  del instrumento.

Una forma inmediata de mejorar la sensibilidad es aumentando  $n_0$ , que equivale a incrementar la actividad de la fuente, lo cual es en general indeseable.

Sin embargo, para cualquier valor de  $n_0$ , hay una relación entre  $u'p$  y  $x$  que hace máxima la sensibilidad  $S$ .

Interesa conocer esa relación, por ser una de las bases de cálculo normalmente utilizadas en el diseño de densitómetros.

Para obtener una expresión de la sensibilidad, independiente de la actividad de la fuente, dividimos  $S$  por  $n_0$  en ec. (1.5).

$$S_n = \frac{S}{n_0} = u' x p e^{-u' x p} \quad (1.6)$$

$S_n$  que denominaremos sensibilidad "normalizada", es sólo función del producto ( $u' x p$ ) y ha sido representada gráficamente en la fig. 2.

Se observa que, efectivamente, ocurre un máximo de  $S_n$  entre  $0 < u' p x < \infty$ . El valor de  $u' p x$  correspondiente al máximo de  $S_n$  puede obtenerse directamente de la curva, o calcularse teóricamente mediante la ecuación

$$\frac{d S_n}{d (u' p x)} = 0$$

Resulta así  $u' p x = 1$ , como una de las condiciones de óptimo diseño.

Dado que lo que se quiere es medir con máxima sensibilidad variaciones de densidad alrededor de un valor nominal  $p_n$ , la distancia  $x$  entre fuente y detector deberá elegirse tal que:

$$x_{\text{ópt}} = \frac{1}{u' p_n} \quad \text{cm} \quad (1.7)$$

El valor de  $u'$  viene determinado por la energía de la radiación.

Para los casos típicos en que se utiliza  $^{137}\text{Cs}$  ó  $^{60}\text{Co}$ , los valores de  $u'$  para agua son

$$u'_{\text{Cs}} \simeq 0,089 \text{ cm}^2/\text{g}$$

$$u'_{\text{Co}} \simeq 0,063 \text{ cm}^2/\text{g}$$

Si  $p_n \simeq 1 \text{ g/cm}^3$ , las distancias óptimas resultan

$$x_{\text{Cs}} \simeq 11 \text{ cm}$$

$$x_{\text{Co}} \simeq 16 \text{ cm}$$

En la práctica se admite bastante flexibilidad en el valor que puede tener el producto  $u'p x$  ya que, como veremos a continuación, hay otro criterio de diseño, basado en el menor error estadístico para el cual  $u'p x = 2$ .

Además, por razones económicas, el mismo equipo podría eventualmente ser utilizado para una amplia escala de densidades. En general se acepta la relación  $0,3 < u'p x < 3$ .

Cualquier variación de la señal entregada por el instrumento que no responda a un cambio real en la densidad, introducirá un error en las mediciones.

Dentro de los errores presentes en los calibradores nucleares, el más importante es el debido a las fluctuaciones estadísticas que son intrínsecas al proceso de desintegración radiactiva. Se impone por lo tanto un análisis de dicho error para determinar su influencia en la precisión del equipo y formas de reducirlo.

Si  $n$  pulsos por segundo es la medida promedio de la intensidad de radiación detectada, existirá siempre una variación  $\pm \Delta n$  alrededor de ese promedio, traducida por una oscilación estadística en la aguja del instrumento de lectura o registro (como ocurre con los integradores o "ratemeters").

La magnitud de  $\Delta n$  depende del valor de  $n$  y del tiempo  $T$  empleado para promediar  $n$ . En efecto, al cabo de  $T$  segundos se tendrá una cantidad  $N$  de pulsos acumulados igual a:

$$N = n T \text{ pulsos}$$

La desviación normal  $\sigma(N)$  de ese valor será:

$$\sigma(N) = (N)^{1/2} = (n T)^{1/2} \text{ pulsos}$$

La desviación normal  $\sigma(n)$  correspondiente al valor  $n$  de pulsos por segundo resulta:

$$\sigma(n) = \frac{\sigma(N)}{T} = \left(\frac{n}{T}\right)^{1/2} \text{ pulsos/segundo}$$

Se sabe, por la teoría de los errores estadísticos de la radiación, que el 99% del tiempo será:

$$\Delta n \leq 2,5 \sigma(n) = 2,5 (n/T)^{1/2} = 2,5 \left( \frac{r_0 e^{-u'p x}}{T} \right)^{1/2}$$

Por lo tanto el error relativo  $\Delta p/p$  de la lectura de densidad debido a las fluctuaciones estadísticas de  $n$  resultará, de acuerdo con ec. (1.5):

$$\frac{\Delta p}{p} \leq \frac{\Delta n}{u' p x n_0 e^{-u' x p}} = \frac{2,5 e^{-u' x p/2}}{u' p x (n_0 T)^{1/2}} \quad (1.8)$$

Este error se puede reducir aumentando  $n_0$  (actividad de la fuente) y  $T$  (tiempo de conteaje para calcular el promedio  $n$ ), pero independientemente de estos valores existe una relación entre  $u' x$  y  $p$  que hace mínimo a  $\Delta p/p$ . Dicha relación puede obtenerse derivando  $(\Delta p/p)$  respecto a  $(u' p x)$  e igualando la derivada a cero.

Resulta así  $u' p x = 2$ .

En el caso de utilizarse integradores ("ratemeters")  $T$  es igual a dos veces la constante de tiempo RC del circuito, es decir  $T = 2 RC$ .

De la ec. (1.8) se puede calcular el valor que debe tener  $n_0$  para limitar el error relativo  $\Delta p/p$  a una cantidad predeterminada para un tiempo  $T$  de conteaje fijo.

En efecto:

$$n_0 \geq \frac{6,25 e^{u' x p}}{(u' x p)^2 T (\Delta p/p)^2} \quad \text{pulsos/s} \quad (1.9)$$

Supongamos que:

$$\frac{\Delta p}{p} = 10^{-3}$$

$$u' x p = 1$$

$$T = 10 \text{ s}$$

Entonces

$$n_0 \geq \frac{6,25 \times 2,72}{10 \times 10^{-6}} \approx 17 \times 10^5 \text{ pulsos/s}$$

Este dato permitiría seleccionar el detector adecuado y calcular la actividad de la fuente.

La misma ecuación (1.2) se utiliza para el diseño de nivómetros basados en la atenuación de rayos gamma.

En este caso conviene escribirla en la forma:

$$n = n_0 e^{-u' x'} \quad \text{pulsos/s} \quad (1.10)$$

donde

$u'$  : coeficiente másico de atenuación total ( $\text{cm}^2/\text{g}$ );

$x' = p x$  : peso por unidad de superficie del absorbente ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).

Si se mide la atenuación gamma a través de un manto de nieve depositado en el suelo, el valor  $x'$  representará el peso de agua por unidad de superficie, es decir, el equivalente en agua del espesor de nieve, que es el dato que interesa a los nivólogos.

Los equipos consisten en una fuente sellada de  $^{60}\text{Co}$  que irradia un haz colimado hacia un detector. Fuente y detector están alineados verticalmente y separados por una distancia determinada por el espesor de nieve que se desea medir y por las limitaciones impuestas por la actividad de la fuente y la sensibilidad del detector. Uno de los elementos (fuente o detector) está a ras del suelo. El otro está soportado por una estructura rígida. Todo el sistema debe permitir la acumulación de nieve entre fuente y detector, sin alterar el proceso normal de deposición.

La electrónica asociada a estos equipos posibilita el registro gráfico de los datos y/o su transmisión a distancia.

El mayor problema de este tipo de instalaciones, es asegurar en forma confiable su funcionamiento automático durante todo el período de nevadas, que en general abarca dos o tres meses.

En la CNEA, con la colaboración del OIEA, se desarrolló un nivómetro registrador automático, que utiliza como detector una película radiográfica. Este equipo se halla descrito en Ref. (3).

Los ensayos en campaña demostraron la viabilidad del método pero indicaron también la necesidad de modificar el actual prototipo.

En los EEUU se está desarrollando un sistema de medición de nieve por atenuación gamma, en el cual la detección se realiza desde un helicóptero.

Para eliminar el efecto de la distancia de detección, se utilizan dos fuentes, una de  $^{137}\text{Cs}$  y otra de  $^{60}\text{Co}$ .

Midiendo separadamente por discriminación de energías la intensidad transmitida por cada una de estas fuentes a través de  $x' \text{ g}/\text{cm}^2$  de nieve y a la distancia de  $r$  metros respecto al detector, se tendrá

$$n_1 = \frac{n_{o1}}{r^2} e^{-u'_1 x'} \quad \text{pulsos/s} \quad (1.11)$$

$$n_2 = \frac{n_{o2}}{r^2} e^{-u'_2 x'} \quad \text{pulsos/s} \quad (1.12)$$

donde

$n_{o1}$  y  $n_{o2}$  representan las respectivas intensidades medidas a 1 metro, sin absorbente (pulsos/s).

Al hacer el cociente entre ambas lecturas resulta:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{n_{o1}}{n_{o2}} e^{-x' (u'_1 - u'_2)} \quad (1.13)$$

Como se observa, la relación entre  $n_1$  y  $n_2$  es independiente de la distancia  $r$  a la que se efectúan las mediciones.

Por lo tanto conocidos  $n_{o1}$  y  $n_{o2}$  y los coeficientes  $u'_1$  y  $u'_2$ , la ec. (1.13) permite calcular  $x'$ .

Este sistema posibilita monitorear desde el aire varias estaciones nivológicas, empleando un sólo detector y equipo electrónico.

**1.1.1.4 Medición de nivel y densidad simultáneas. Aplicación en nivometría.**  
En los equipos radioisotópicos, las variaciones de nivel de un líquido en un recipiente se pueden relacionar con la atenuación de rayos gamma, ya sea en un sistema fuente-detector fijo o en un sistema móvil.

Las figs. 3 (a), (b) y (c) ilustran algunos de los diferentes métodos utilizados en la práctica.

En la CNEA se ha diseñado un sistema de telemedición para la lectura simultánea o individual del nivel, densidad media y peso de líquidos almacenados en grandes tanques, como los utilizados en las industrias del petróleo, gas, química y petroquímica.

El principio de funcionamiento es el siguiente (fig. 3 d):

Una sonda de medición tipo "C" abraza un tubo de comunicación lateral del tanque (1) de modo que fuente (2) y detector (3) quedan diametralmente opuestos respecto al tubo.

Al accionar un comando a distancia la sonda, partiendo de la posición de reposo (4) - (4), inspecciona la columna líquida con velocidad uniforme, utilizando el mismo tubo de comunicación lateral como guía de su desplazamiento. El movimiento se consigue mediante cable, poleas, un tambor de arrollamiento del cable y un electromotor. Al girar el tambor de arrollamiento se generan pulsos sincronizados con el movimiento vertical de la sonda mediante un sistema fotoeléctrico (disco perforado, haz de luz y fotodiodo). A su vez salen pulsos del detector de la sonda a una frecuencia que depende de la densidad del líquido en la zona atravesada por las radiaciones, de acuerdo a la ec. (1.2). En el circuito electrónico auxiliar hay también un generador de pulsos que actúa como reloj digital.

El pasaje de estas tres clases de pulsos de movimiento, densidad y tiempo, a los respectivos instrumentos contadores, está controlado por una compuerta electrónica que se abre o cierra en función de las variaciones de señal a la salida del detector de radiaciones de la sonda.

Segundos después de la puesta en marcha del motor, cuando el sistema móvil alcanza velocidad uniforme, la sonda en su movimiento ascendente, pasa frente a una fuente radiactiva auxiliar de disparo (5) focalizada hacia el detector de la sonda. Se produce así un brusco aumento en la señal del detector, que en virtud del movimiento de la sonda y la colimación del haz de radiación emergente de la fuente auxiliar, afecta la forma de un pulso de corta duración.

Este pulso tiene sin embargo la amplitud suficiente para provocar la apertura de la compuerta electrónica, permitiendo a partir de entonces el pasaje y registro a distancia de las tres categorías de pulsos antes mencionados.

En el mismo instante en que la sonda sobrepasa la superficie de nivel del líquido en el tubo de comunicación lateral, se produce otro brusco aumento de la intensidad de radiación detectada en la sonda debido a que los rayos gamma provenientes de la fuente, llegan al detector sin ser atenuados por la masa del fluido.

Esta segunda variación de la señal cierra la compuerta, quedando así indicados los siguientes datos:

1) cantidad de impulsos de movimiento acumulados entre la posición de la fuente auxiliar de disparo y el nivel del líquido en el tanque;

2) cantidad de pulsos de radiación (función de la densidad del líquido), acumulados por la sonda entre las posiciones mencionadas;

3) cantidad de pulsos de tiempo correspondientes al período de las mediciones anteriores.

La información 1) permite conocer inmediatamente el nivel, ya que cada impulso de movimiento corresponde a un determinado recorrido de la sonda en milímetro. (por ejemplo un milímetro por cada impulso).

En consecuencia sumando a este primer registro un valor constante dado por la altura de la fuente auxiliar de disparo, se obtiene el nivel del líquido en el tubo de comunicación lateral.

Dividiendo la información 2) por la información 3) se tiene la frecuencia media (en pulsos/s) de acumulación de impulsos provenientes de la radiación detectada por la sonda a través de la misma columna líquida donde se midió el nivel. Dicha frecuencia media corresponde, por la ec. (1.2), a la densidad media del líquido en el perfil vertical inspeccionado.

El nivel y la densidad media permiten calcular fácilmente el peso del líquido almacenado en el tanque.

Todos los cálculos se pueden hacer manualmente o por medio de una computadora simple. En este último caso pueden ser inscriptos y registrados juntos con información adicional como código del tanque, fecha y hora de la medición.

Una vez que la sonda ha completado su carrera ascendente en el tubo de comunicación lateral, regresa por accionamiento de microcontactos a la posición inicial donde queda detenida hasta que en forma manual o automática le sea requerida otra inspección.

El sistema descrito tiene las siguientes ventajas:

a) todas las mediciones se ejecutan con una sola y única sonda, exterior al tanque y sin contacto con el líquido;

b) la determinación directa del peso del líquido almacenado elimina correcciones por temperatura;

c) el sistema de telemetría es simple eliminándose errores de la transmisión mecánica del movimiento (alargamiento del cable de la sonda y variaciones en la velocidad de rotación del motor);

d) los mismos equipos se aplican a diferentes tanques, siendo el error de medición independiente de la altura del tanque;

e) el costo es competitivo con respecto a otros sistemas convencionales de similares funciones operativas.

La teoría de diseño y ensayos de laboratorio del prototipo construido, se describen en Refs (1) y (2).

Se podría aplicar un método similar para medir el espesor de nieve y la densidad media del depósito.

En este caso fuente y detector se deberían desplazar, en forma sincronizada dentro de sendos tubos de acero, dispuestos verticalmente y separados por una distancia apropiada (alrededor de 50 cm, si se utiliza una fuente de  $^{137}\text{Cs}$ ).

El equipo tendría, respecto a otros sistemas, las siguientes ventajas:

- aplicable a cualquier espesor de nieve;
- precisión constante en la medición de la altura del depósito;
- precisión creciente con el espesor de nieve, para la medida de densidad media;
- fácilmente adaptable para la telemetría de datos;
- baja actividad de la fuente.

La principal desventaja sería el consumo de energía para el movimiento de fuente y detector, en el caso de operación automática durante largo tiempo.

1.1.1.5 Medición de concentración. Aplicación a estudios de contaminación de aguas. El coeficiente másico de atenuación total  $u'$  definido por la ec. (1.3) tiene en cuenta todos los procesos de interacción por los cuales los fotones de radiación electromagnética pueden ser absorbidos o desviados en su trayectoria a través de los materiales.

Estos procesos son tres y se conocen con los nombres de efecto Compton, absorción fotoeléctrica y producción de pares, (fig. 4).

Designando  $u'_c$ ,  $u'_f$  y  $u'_p$  a los respectivos coeficientes másicos de

$$u' = u'_c + u'_f + u'_p \quad \text{cm}^2/\text{g}$$

Los coeficientes másicos parciales dependen de la energía de la radiación electromagnética y del número atómico  $Z$  del medio absorbente, predominando fuertemente en el valor de  $u'$  uno u otro de dichos coeficientes parciales, según el caso.

Esta circunstancia se aprovecha para medir la concentración de elementos a través de la atenuación de radiación electromagnética de energía apropiada.

Por ejemplo para la energía de los rayos gamma del  $^{137}\text{Cs}$  o del  $^{60}\text{Co}$  (entre 0,6 y 1 MeV aproximadamente) y para elementos de mediano y bajo  $Z$  predomina la atenuación por efecto Compton, cuyo coeficiente másico  $u'_c$  es proporcional a la relación  $Z/A$  ( $A$  es el peso atómico del elemento).

En consecuencia y para estas energías el coeficiente másico de atenuación total en hidrógeno será aproximadamente el doble que para otros elementos livianos como el C.

De aquí que se use la atenuación gamma del  $^{137}\text{Cs}$  o  $^{60}\text{Co}$  para medir la concentración de H en hidrocarburos. El alto poder penetrante de esta radiación gamma permite efectuar la medición directamente en el proceso, a través de las paredes de cañerías y equipos industriales.

En la escala de bajas energías, en el orden de algunos KeV, se aprovecha el efecto de absorción fotoeléctrica selectiva.

A título ilustrativo en la tabla siguiente se dan los coeficientes másicos de atenuación aproximados en diversos elementos para la radiación  $\gamma$  de algunas fuentes de baja energía:

Tabla 1. Valores aproximados del coeficiente másico de atenuación en varios elementos, para radiación gamma de baja energía.

| Radioisótopo                                      |                  | $^{57}\text{Co}$ | $^{241}\text{Am}$ | $^{109}\text{Cd}$ |
|---------------------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Período                                           |                  | 270 días         | 458 años          | 435 días          |
| Energía (kev)                                     |                  | 122              | 59,6              | 22,1              |
| u'<br>(cm <sup>2</sup> /g)<br>valores aproximados | H <sub>2</sub> O | 0,019            | 0,024             | 0,04              |
|                                                   | I                | 1,30             | 7,45              | 21                |
|                                                   | U                | 3,5              | 4,73              | 70                |
|                                                   | Ca               | 0,20             | 0,63              | 12                |
|                                                   | Na               | 0,14             | 0,22              | 1,90              |
|                                                   | Pb               | 3,5              | 3,6               | 70                |
|                                                   | Si               | 0,16             | 0,3               | 4,25              |
|                                                   | Fe               | 0,28             | 1,18              | 25,2              |
|                                                   | Cu               | 0,35             | 1,56              | 33,4              |

Puede notarse que para el agua el coeficiente de atenuación es relativamente bajo comparado con elementos de alto Z.

Esto sugiere la posibilidad de utilizar la atenuación gamma de baja energía para medir la concentración en agua de iones metálicos en solución.

El diseño de los equipos sería similar al de las sondas empleadas para medir la concentración de sedimentos en suspensión.

### 1.1.2 Retrodispersión

En el punto 1.1.1.5 se vió que hay tres procesos de interacción, definidos cada uno por su respectivo coeficiente de atenuación, por los cuales un fotón puede ser absorbido o desviado en su trayectoria a través de un material y que para valores intermedios de energía gamma predomina la atenuación por efecto Compton. En el efecto Compton el fotón original es desviado de su trayectoria, prosiguiendo su camino en otra dirección y con menor energía.

Por lo tanto si se irradia un material con rayos gamma habrá un cierto número de fotones retrodispersados (radiación secundaria) que emergerán por la misma superficie de incidencia, es decir hacia el mismo semi espacio respecto al medio absorbente, donde se halla ubicada la fuente radiactiva.

El coeficiente lineal de atenuación Compton, en  $\text{cm}^{-1}$ , es proporcional al producto de la densidad  $\rho$  del material por la relación  $Z/A$ .

Como  $Z/A$  es aproximadamente constante para todos los elementos excepto el hidrógeno, la producción Compton de fotones dispersos por unidad de recorrido será proporcional a la densidad del medio irradiado, con independencia de su composición química.

Esto sugiere la posibilidad de utilizar la radiación dispersa proveniente del efecto Compton, para medir el espesor o la densidad de los materiales.

1.1.2.1 Medición de espesor. A igualdad de otras condiciones la intensidad de fotones retrodispersados será función del espesor del medio reflector, según una ley que puede determinarse empíricamente, y que es del tipo

$$I = I_0 (1 - e^{-ax}), \quad \text{fotones/s}$$

donde:

- $I_0$  : intensidad para espesor "infinito" (fotones/s);  
 $x$  : espesor del reflector (cm);  
 $a$  : coeficiente lineal de retrodispersión que depende del sistema de medición ( $\text{cm}^{-1}$ ).

La geometría de medición por retrodispersión gamma se ilustra en la fig. 5.

Se observa que es preciso colocar un blindaje contra la radiación directa entre fuente y detector.

En algunos equipos se aprovecha la circunstancia de que la radiación retrodispersada tiene mucho menor energía que la radiación directa, utilizándose detectores que permiten discriminar la primera de la segunda en base a la diferencia de energías. De este modo sólo se detecta la radiación retrodispersada sin la interferencia indeseable de la radiación directa con lo cual el peso del equipo se reduce al eliminar el blindaje, al mismo tiempo que mejora la eficiencia geométrica de detección.

Los equipos comerciales son portátiles, y se usan para la inspección de paredes de tuberías y tanques, con similares ventajas que en el método por atenuación.

1.1.2.2 Medición de densidad de suelos. Si el medio irradiado se puede considerar de "espesor infinito", la intensidad de radiación retrodispersada será función de la densidad del medio.

Este es el principio de funcionamiento de los medidores de densidad de suelos, tales como las sondas radioisotópicas que para ese objeto, se utilizan en el perfilaje de pozos, fig. 6.

Para analizar la teoría de estos equipos, supongamos una fuente radiactiva de actividad  $A_0$  fotones por segundo y un detector de superficie sensible  $F \text{ cm}^2$ , sumergidos ambos en un medio absorbente homogéneo de densidad  $p$  y separados por la distancia  $r \text{ cm}$ .

En este caso llegarán al detector  $n$  fotones/s de radiación directa atenuados por el espesor  $r \text{ cm}$  y  $n'$  fotones/s de radiación dispersada por el medio en dirección al detector. Los fotones dispersos tendrán lógicamente un amplio espectro de energías que depende del ángulo de deflexión y del número de choques sufridos antes de llegar al detector. Si  $u \text{ cm}^{-1}$  es el coeficiente de atenuación lineal de la radiación directa en el material considerado, tendremos:

$$n = \frac{A_0 F}{4 \pi r^2} e^{-ur} \quad \text{fotones/s} \quad (1.14)$$

Experimentalmente se observa que:

$$n' = a (ur)^b n \quad \text{fotones/s}$$

donde a y b son constantes que dependen de la energía de la radiación primaria y del material absorbente.

Por lo tanto:

$$n' = \frac{A_0 F a (ur)^b}{4 \pi r^2} e^{-ur} \quad \text{fotones/s}$$

Si se elimina mediante un blindaje la radiación directa, la respuesta R del detector, en pulsos por segundo, será proporcional a n'. Agrupando las constantes en una sola, que denominamos K, se tendrá entonces

$$R = \frac{K (ur)^b e^{-ur}}{r^2} \quad \text{pulsos/s}$$

Dado que por ec. (1.3):

$$u = u' p$$

resulta finalmente

$$R = \frac{K (u' p r)^b e^{-u' p r}}{r^2} \quad \text{pulsos/s} \quad (1.15)$$

La ec. (1.15) da la respuesta del equipo en función de los parámetros que intervienen en la medición.

Para radiación gamma de energía moderada, el coeficiente u' será prácticamente igual a u'\_c (coeficiente másico de atenuación Compton).

Se puede demostrar que para una dada energía u'\_c es aproximadamente igual para todos los materiales, con excepción del hidrógeno.

Por lo tanto, una vez establecida la distancia r, la respuesta R del instrumento será solamente función de la densidad p con independencia de la composición química del medio, y la forma de dicha función estará representada por la ec. (1.15). En la práctica esto se cumple aproximadamente, ya que las constantes K y b pueden variar con la composición del material, sobre todo si existe una concentración elevada de elementos de alto número atómico Z. Como esto sólo ocurre excepcionalmente en los suelos investigados en la práctica, la ec. (1.15) se puede utilizar con

suficiente exactitud para representar la respuesta del equipo en función de la densidad y para determinar los parámetros de óptimo diseño.

El análisis detallado de dichos parámetros se halla publicado en Ref. (4)

Las sondas de medición de densidad se aplican en ingeniería hidráulica para estudios de mecánica de suelos, y en hidrología, para medir la porosidad de los estratos en una perforación.

La densidad bruta  $p$ , que es la respuesta del instrumento, está relacionada con la porosidad  $\phi$  de la formación mediante la fórmula:

$$p = \phi p_f + (1 - \phi) p_g \quad \text{g/cm}^3 \quad (1.16)$$

donde

$p_f$  : densidad del fluido que invade la formación inspeccionada ( $\text{g/cm}^3$ )

$p_g$  : densidad del grano o matriz de la formación ( $\text{g/cm}^3$ )

Por lo tanto:

$$\phi = \frac{p_g - p}{p_g - p_f} \quad (1.17)$$

Los valores comunes de  $p_g$  se indican en la siguiente tabla:

Tabla 2. Densidad de grano

| Tipo de formación                 | Densidad $p_g$ ( $\text{g/cm}^3$ ) |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| arenas, areniscas y cuarcitas     | 2,65                               |
| arenas calizas o calizas arenosas | 2,68                               |
| calizas                           | 2,71                               |
| dolomitas                         | 2,87                               |

El fluido dentro de los poros de las formaciones permeables, en la zona de relativamente poco espesor investigada por la sonda (alrededor de 15 cm), es en general filtrado del barro presente durante la perforación. Este filtrado puede tener una densidad variable alrededor de  $1 \text{ g/cm}^3$  dependiendo de su salinidad, presión y temperatura.

Existen gráficos que permiten determinar  $p_g$  en función de dichos parámetros Ref. (5).

En la aplicación práctica de sondas como la descrita, para perfilajes de densidad, aparecen complicaciones debidas a la presencia de costras de barro (revoques) e irregularidades en la pared del pozo.

Para corregir automáticamente estos efectos, se utiliza ahora el perfil de densidad por compensación.

En ese sistema, se utilizan dos detectores con diferentes espaciamientos respecto a la fuente radiactiva. La sonda nuclear forma parte de una herramienta que combina el perfilaje del diámetro del pozo (calibrado), con el de densidad. (fig. 7).

Durante el perfilaje, la sonda permanece adosada a la pared del pozo por acción de un resorte. El uso de dos detectores permite compensar automáticamente el efecto del revestimiento de barro que puede quedar interpuesto entre la pared y la zapata, sin necesidad de un conocimiento previo de su espesor y composición. La influencia de rugosidades en la superficie donde apoya la zapata, queda también eliminada.

La corrección de la densidad se obtiene mediante un computador analógico ubicado fuera del pozo, el cual procesa los datos provenientes de los dos detectores.

La teoría de este método se halla explicada en Ref. 6.

### 1.1.3 Fluorescencia de rayos X (FRX)

En la absorción fotoeléctrica el fotón desaparece transfiriendo toda su energía al electrón del átomo con el cual interacciona (fig. 4).

El electrón es eyectado del átomo con una energía cinética igual al exceso de la energía del fotón con respecto al potencial de ionización de la capa correspondiente y la vacante es llenada por un electrón de otra órbita más alejada del núcleo, con la emisión de radiación electromagnética. Este proceso se conoce como fluorescencia.

La mayor probabilidad de interacción fotoeléctrica corresponde a electrones de las órbitas internas (capas K, L y M) y los fotones emitidos en este caso durante

el proceso de fluorescencia, se denominan rayos X característicos.

La razón de esta denominación es que dichos rayos tienen una energía perfectamente definida, característica del elemento que los emite, y cuyo valor es la diferencia de energías entre los niveles de transición; así, si una vacante de la capa K (energía  $E_K$ ) es llenada por un electrón de la capa L (energía  $E_L$ ) la energía  $E_X$  del rayo X será:

$$E_X = E_K - E_L$$

1.1.3.1 Medición de concentración. La medición de los rayos X característicos de un elemento, permite determinar cuantitativamente la concentración de dicho elemento en una muestra.

El proceso de absorción fotoeléctrico que da lugar a la excitación de rayos X predomina para energías bajas de radiación electromagnética ( $E < 100 \text{ kev}$ ) y el correspondiente coeficiente de absorción presenta valores máximos o picos de absorción para energías ligeramente superiores a las requeridas para ionizar las capas K, L y M de un determinado elemento.

La radiación electromagnética requerida para excitar por fluorescencia los rayos X característicos se puede obtener directamente con una fuente gamma de baja energía, o mediante la combinación de un emisor gamma de baja energía con un blanco secundario apropiado. En este último caso, los rayos X característicos excitados en el blanco se emplean a su vez para excitar los rayos X característicos de la muestra.

En la práctica al irradiar una muestra se obtendrán también en general rayos X característicos de otros componentes distintos al buscado que si no se discriminan interferirán en las mediciones.

En los analizadores portátiles por FRX, se recurre preferentemente al uso de filtros que, en la forma de láminas delgadas, se colocan frente al detector. La adecuada selección de filtros permite en una o dos medidas sucesivas según los casos, identificar un determinado rayo X característico en presencia de otros que tienen muy próxima energía.

La fig. 8 ilustra la disposición de los diferentes elementos que integran la sonda de medición de un analizador portátil por FRX.

Estos equipos tienen la ventaja de permitir el análisis rápido y preciso sobre el terreno de muestras líquidas y lodos, en muchos casos en menos de 30 s, con precisión hasta del 0,05%, dependiendo del elemento y de la matriz de la muestra. Al igual que las sondas basadas en la atenuación de radiación gamma por efecto fotoeléctrico (Sección 1.1.1.5), las sondas por FRX se pueden utilizar para estudiar la contaminación de aguas.

Actualmente la firma Texas Nuclear de los EEUU está desarrollando un analizador portátil por FRX para perfilaje de pozos. Aunque en principio el equipo se destinará al análisis de uranio, su campo de aplicación podrá extenderse a la prospección de minerales y por ende al estudio de aguas subterráneas.

Los analizadores de laboratorio por FRX no se han difundido tanto en la práctica, como los equipos portátiles.

Sin embargo sus posibilidades de aplicación son tan amplias como las de los instrumentos convencionales de análisis por rayos X, con las ventajas de su menor costo y simplicidad de operación.

## 1.2.0 USO DE PARTICULAS CARGADAS

### 1.2.1 Atenuación

La intensidad de radiación beta (en número de partículas por unidad de tiempo) transmitidas a través de un material y medida en una geometría fija, sigue una ley aproximadamente exponencial en función del espesor del material absorbente.

Como las partículas beta tienen una bien definida profundidad de penetración en materiales específicos para energías dadas, la ley aproximada de atenuación regirá sólo hasta ese límite de espesor, conocido como rango máximo.

Dentro de dicho límite y en forma similar a lo explicado para la radiación electromagnética (Sección 1.1.1), la atenuación beta podrá expresarse como:

$$n = n_0 e^{-u' x p} \quad \beta/s \quad (1.18)$$

donde

$n_0$  : intensidad de radiación incidente ( $\beta/s$ );

$u'$  : coeficiente másico aparente de atenuación para la radiación  $\beta$  en el medio considerado ( $\text{cm}^2/\text{g}$ );

$x$  : espesor del absorbente (cm);

$p$  : densidad del absorbente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

El coeficiente  $u'$  depende de la máxima energía del espectro  $\beta$  emitido por la fuente ( $E_{\text{máx.}}$ ) y de la composición química del medio absorbente ( $Z$ , número atómico;  $A$ , peso atómico).

Para  $Z \leq 13$

$$u' = \frac{3,5}{E_{\text{máx}}^{1,14}} \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \quad (1.19)$$

Para  $Z > 13$

$$u' = \frac{7,7}{E_{\text{máx}}^{1,14}} \cdot Z^{0,31} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \quad (1.20)$$

La dependencia de la atenuación beta con el espesor, densidad y composición química de los materiales provee las bases para su utilización en la medida de dichos parámetros.

El relativamente bajo poder penetrante de la radiación  $\beta$  obtenible con las fuentes radiactivas de uso común, limita su uso en medición de espesores para materiales de hasta unos  $10.000 \text{ g/cm}^2$  (aproximadamente 3 mm de aluminio).

La medida de concentración por atenuación  $\beta$  sólo se aplica para determinar la relación entre el contenido de carbono e hidrógeno en los hidrocarburos ya que, según ec. (1.18), el coeficiente másico aparente de atenuación para hidrógeno, es el doble que el correspondiente a otros elementos de  $Z < 13$ .

La medida de densidad, en cambio, puede tener aplicación directa en hidrología para determinar la concentración de sedimentos en agua.

**1.2.1.1 Medición de densidad.** Las ecuaciones (1.19) y (1.20) demuestran que para todos los elementos, excepto el hidrógeno, el coeficiente  $u'$  varía poco con la composición química del medio.

Por lo tanto, manteniendo fijo el espesor  $x$  del absorbente, la atenuación beta será función solamente de la densidad.

Como en el caso de la atenuación gamma las variaciones de densidad del agua pueden asociarse a variaciones de concentración de los sedimentos que pueda llevar en suspensión.

La teoría de diseño de los equipos es igual a la descrita en la Sección 1.1.1.3. Sólo que para fuentes beta el recorrido de la radiación en agua se reduce a unos pocos milímetros. Por ejemplo, para  $^{90}\text{Sr}$  el espesor óptimo de agua sería de unos 5 mm pudiendo llegarse, como máximo a 15 mm.

Las sondas de los medidores de concentración de sedimentos por atenuación de radiación beta, ofrecerían la ventaja de no requerir prácticamente blindaje (menor peso) y facilitar determinaciones verdaderamente puntuales en toda la sección transversal de un río.

### 1.2.2 Retrodispersión beta

Por efecto de una o de sucesivas interacciones dentro del material las partículas beta pueden emerger por la misma superficie de incidencia dando lugar al fenómeno conocido como retrodispersión beta.

La intensidad de radiación retrodispersada aumenta con el espesor del material reflector hasta un máximo o valor de saturación, correspondiente a un espesor característico de cada material y que se denomina espesor "infinito" (aproximadamente igual a la mitad del alcance máximo de la radiación beta en el material considerado).

La retrodispersión se debe fundamentalmente al campo eléctrico del núcleo atómico (cantidad de protones = Z) y por lo tanto su intensidad crece con el número atómico Z del reflector.

En la fig. 9 se representan las principales características de la retrodispersión de partículas beta.

1.2.2.1 Medición de concentración. La intensidad de retrodispersión beta a saturación (en partículas retrodispersadas por segundo), en una muestra sólida, líquida o gaseosa, es función de los números atómicos de los elementos que componen la muestra.

Los métodos basados en la retrodispersión beta son particularmente indicados para la medición continua de la concentración de un ión metálico en una solución líquida, tal como mercurio en agua.

El método está esquematizado en la fig. 10.

La intensidad de corriente I, o lo que es lo mismo la deflexión de la aguja del instrumento, dependerá del número atómico Z del ión metálico y de su concentración C

$$I = f (Z, C) \quad (1.21)$$

aumentando para valores crecientes de Z y C (fig. 11)

La forma de la ec. (1.21) se podrá establecer para cada caso particular, va riando la concentración del elemento que se desea controlar.

El radioisótopo preferentemente usado es el  $^{90}\text{Sr}$ ; el espesor de la muestra debe ser tal que se obtenga retrodispersión a saturación en el líquido.

### 1.3.0 USO DE NEUTRONES

El neutrón es una partícula neutra (sin carga eléctrica), de masa atómica aproximadamente igual a la unidad.

A diferencia de las otras radiaciones consideradas no interacciona con los electrones orbitales de los átomos sino con sus núcleos.

Los neutrones se clasifican en tres grupos de acuerdo a su energía cinética: térmicos (o lentos) epitérmicos y rápidos.

Los neutrones térmicos tienen la misma velocidad que las moléculas de un gas ideal a la temperatura considerada. En la Tabla 3 se dan las energías que delimitan cada uno de los grupos, y otras informaciones de interés.

Tabla 3. Clasificación de los neutrones

| Nombre      | Energía              | Principal Interacción                                      | Comentario                                                                                    |
|-------------|----------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Térmicos    | 0.025 ev<br>(a 22 C) | Captura simple (n, $\gamma$ )                              | Distribución de Maxwell de las velocidades. Velocidad media $v = 2.200 \text{ m/s}$ .         |
| Epitérmicos | 0.5 ev-10 kev        | Dispersión elástica (n, n) y captura simple (n, $\gamma$ ) | La probabilidad de absorción es proporcional a $1/v$ , con picos de resonancias superpuestos. |
| Rápidos     | 10kev-20Mev          | Dispersión elástica (n, n)                                 | La mayoría de los neutrones son emitidos por los núcleos en este intervalo de energías.       |

### 1.3.1 Fuentes de neutrones

Los neutrones pueden ser producidos por:

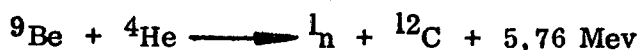
- reactores nucleares;
- fuentes radioisotópicas;
- aceleradores de partículas.

Los reactores nucleares proveen un alto flujo de neutrones y se utilizan tanto para la generación de energía como para la producción de radioisótopos artificiales. Dentro de esta última aplicación se incluye también el análisis por activación.

Las fuentes radioisotópicas combinan un radioisótopo con material que actúa como blanco de las radiaciones emitidas por el primero, ambos mezclados íntimamente y encapsulados para su uso industrial.

La radiación interacciona con el material del blanco produciendo nucleidos inestables que decaen inmediatamente con la emisión de neutrones.

Una reacción típica es la que tiene lugar entre una partícula alfa ( $^4\text{He}$ ) y un núcleo de berilio ( $^9\text{Be}$ ), para dar finalmente carbono ( $^{12}\text{C}$ ).



que se abrevia como  $^9\text{Be} (\alpha, n) ^{12}\text{C}$ .

Los 5,76 Mev son el exceso de energía de la reacción nuclear. Una pequeña parte de esta energía se gasta en el retroceso del nucleido producido y el resto se imparte en la forma de energía cinética, al neutrón emitido como consecuencia de la reacción. A esta energía debe sumarse la energía cinética que traía la partícula alfa interviniente en la reacción.

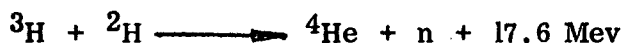
Dado que existen emisores alfa de largo período ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ , etc) se pueden fabricar fuentes radioisotópicas de neutrones basadas en la reacción  $(\alpha, n)$  diseñadas como fuentes pequeñas, portátiles y permanentes.

Estas fuentes radioisotópicas han encontrado interesantes aplicaciones en la industria, particularmente en el perfilaje de pozos petrolíferos y, al presente, para el perfilaje de pozos en el estudio de aguas subterráneas.

Los neutrones pueden también ser producidos mediante reacciones nucleares obtenidas con aceleradores de partículas cargadas.

Uno de los métodos más generalizados consiste en acelerar en vacío iones de deuterio mediante un campo eléctrico de unos 100.00 V y bombardear átomos de tritio ocultos en un blanco de material adecuado (por ej. zirconio).

En estas condiciones ocurre la siguiente reacción:



Se ha despreciado la energía del deuterón. De los 17,6 Mev, 14 Mev se transfieren a los neutrones en la forma de energía cinética.

El avance tecnológico en el diseño de aceleradores ha posibilitado la construcción de generadores de neutrones portátiles y compactos de tamaño reducido como para permitir su utilización en el perfilaje de pozos, y capaces de operar ya sea en forma continua o pulsante según las propósitos de la medición.

Los varios tipos de perfilajes neutrónicos actualmente en uso, configuran una de las técnicas más útiles para el estudio de aguas subterráneas. Esto se debe, en gran parte, a que la respuesta de las sondas es función de la concentración de hidrógeno en el medio, es decir, del contenido de agua en las formaciones.

El perfilaje neutrónico tiene varias ventajas sobre otros perfilajes nucleares: puede utilizarse en pozos llenos o secos, estén estos entubados o no, y el volumen de terreno explorado es relativamente grande.

Los perfilajes neutrónicos proveen una medida de la porosidad en rocas saturadas, y de la humedad porcentual del terreno arriba de la napa subterránea.

Las sondas neutrónicas se emplean también para determinar el coeficiente de almacenaje de acuíferos no confinados. (Ref. 7)

Los neutrones emitidos por las fuentes radioisotópicas y los aceleradores portátiles corresponden a la categoría de neutrones rápidos, es decir, de alta energía cinética.

Cuando estos neutrones abandonan la fuente y penetran en el medio irradiado dan lugar a diferentes procesos de interacción algunos de los cuales fundamentan las aplicaciones prácticas que se tratan a continuación.

### 1.3.2 Dispersión y captura

Los neutrones rápidos chocan con los núcleos atómicos del medio irradiado y son dispersados generalmente en otra dirección, con pérdida de su velocidad, hasta llegar a los estados epitérmico y térmico.

Las colisiones que causan la dispersión de neutrones pueden ser "elásticas" o "inelásticas".

En el primer caso la energía cinética original que traía el neutrón es compartida como energía cinética entre el núcleo atómico y el neutrón disperso. Es similar al choque entre bolas de billar. Cuanto menor es la masa del núcleo atómico que participa de la colisión tanto mayor es la energía cinética que adquiere, y por lo tanto el neutrón disperso resulta con mucho menor energía cinética que antes del choque.

En el segundo caso, parte de la energía cinética original se pierde además en excitar internamente el núcleo, elevando su nivel energético. Este estado del núcleo es inestable y el exceso de energía es reemitido instantáneamente como radiación electromagnética la cual es característica del núcleo excitado. Este proceso sólo tiene lugar con neutrones rápidos.

Una consecuencia de la dispersión de neutrones es que al cabo de cierto número de colisiones, los neutrones originariamente rápidos emitidos por la fuente alcanzan el estado térmico. En estas condiciones continúan chocando elásticamente sin ganar ni perder energía en el promedio, hasta que finalmente son capturados por alguno de los núcleos del medio.

Este proceso dura entre 100 a 1000 micro segundos, desde la emisión del neutrón rápido, dependiendo del material donde los neutrones se difunden.

Por ej. un neutrón cuya energía inicial es 1 Mev es desacelerado hasta la energía térmica por 18,90 y 114 choques, en promedio, con núcleos de hidrógeno, berilio y carbono.

La absorción de un neutrón por captura equivale a una reacción nuclear. En el instante de la captura del neutrón térmico el nuevo núcleo compuesto emite uno o más rayos gamma de alta energía, que son característicos de dicho núcleo y difieren bastante de los que el mismo elemento hubiera emitido por dispersión inelástica de neutrones rápidos.

1.3.2.1 Medición de concentración por moderación (perfilaje neutrón-neutrón y neutrón-gamma). Como el período de difusión termina con la captura del neutrón lento y el hidrógeno es un medio moderador altamente eficaz en comparación con otros elementos, la detección y medida de los neutrones térmicos puede relacionarse con la concentración de hidrógeno en un medio irradiado con neutrones rápidos.

Si fuente y detector están próximos mayor concentración de hidrógeno estará asociada a un aumento en la intensidad de neutrones lentos detectados. Es el caso de las sondas para medir humedad de suelos.

En cambio si fuente y detector están espaciados a una distancia adecuada, el proceso será a la inversa ya que los neutrones rápidos serán termalizados por el medio en un corto recorrido respecto a la fuente, y capturados antes de que puedan llegar al detector.

Así funcionan las sondas para perfilaje de pozos por la técnica neutrón-neutrón. Este segundo método tiene la ventaja de que el volumen de material "explorado" por los neutrones antes de la detección, es mucho mayor que en el primer caso.

La cantidad de neutrones térmicos detectados dependerá no sólo del contenido de hidrógeno del medio, sino también de la presencia de elementos con alta sección de captura.

Las lecturas resultan entonces afectadas por la composición química de los estratos.

Para obviar este inconveniente se recurre en muchos casos a la detección de los neutrones epitérmicos en lugar de los neutrones térmicos, porque en ese rango de energías la sección eficaz de captura es mucho menor.

Se obtiene así una respuesta que es prácticamente función de la concentración de hidrógeno y no de la composición química.

El perfilaje neutrón-gamma se hace con una sonda similar a la anterior pero utilizando un detector gamma en lugar de neutrones. Se miden entonces los rayos gamma producidos cuando los neutrones térmicos son capturados por elementos de la formación. Como el cloro tiene justamente alta sección eficaz para la captura de neutrones térmicos, la producción y por lo tanto la detección de rayos gamma aumentará con la concentración de cloro.

La comparación entre el perfilaje con neutrones epitérmicos que es insensible a la composición química y el perfilaje neutrón-gamma da en consecuencia, las bases teóricas para medir la concentración de cloro "in-situ" y a través del entubamiento. El método se ha aplicado a la determinación de la interfase entre agua dulce y agua salina, en pozos entubados.

**1.3.2.2 Medición de concentración por dispersión inelástica y captura.** En el método anterior, la medición de neutrones lentos y epitérmicos puede correlacionarse con la concentración de hidrógeno pero no permite por sí sólo discriminar si el hidrógeno proviene de agua, agua salina, petróleo u otros compuestos hidrogenados de la formación investigada.

En años recientes se han desarrollado técnicas de perfilaje basadas en el uso de aceleradores de partículas que permiten al ser operados en forma pulsante, detectar aisladamente los rayos gamma originados ya sea en procesos de dispersión inelástica o de captura de neutrones térmicos.

Ambos tipos de rayos son característicos de los elementos que los emiten y, para un mismo nucleido, difieren por su energía según procedan de uno u otro proceso.

Las fuentes radioisotópicas, al emitir un flujo continuo de neutrones rápidos, no permiten diferenciar los rayos gamma originados por dispersión inelástica, de los rayos gamma de captura pues ambos procesos ocurrirán simultáneamente. La detección gamma en tal caso daría un espectro resultante de la superposición de ambas emisiones, que es de complicada e incierta interpretación.

Al operar un generador de neutrones rápidos en forma pulsante y sincronizada con un detector, de tal forma que este último reciba dos secuencias de radiación gamma, la una durante el pulso de neutrones rápidos (unos 10 microsegundos) y la otra durante el intervalo subsiguiente, se obtendrán los espectros gamma correspondientes a la dispersión inelástica de neutrones rápidos y a la captura de los neutrones térmicos respectivamente.

La fig. 12 muestra esquemáticamente este proceso, y la fig. 13 (a, b y c) es una representación ideal de los espectros gamma que pueden obtenerse en cada caso, bombardeando con neutrones rápidos arena cuyos poros están impregnados con una mezcla de petróleo y agua salada,

La altura relativa de las líneas del espectro dependerá de la concentración del elemento correspondiente.

En la práctica estos rayos gamma monoenergéticos pueden sufrir una o más dispersiones en la formación antes de ser detectados por la sonda. Por lo tanto, los espectros reales que llegan al detector resultan más esparcidos que los representados en la fig. 13.

Las figs. 13 a) y b) demuestran que la operación pulsante de la fuente permite separar bien los efectos del carbono y el oxígeno de aquellos debidos al hidrógeno, sílice y cloro, facilitando la interpretación segura del perfilaje.

**1.3.2.3 Medición de concentración por distribución de los neutrones en el tiempo.** Otro método de prospección nuclear posibilitado por el advenimiento de las fuentes pulsantes, se basa en el estudio de la densidad relativa de neutrones en función del tiempo, a partir del instante en que fue liberado el pulso de neutrones rápidos.

El equipo consiste en un generador pulsante de neutrones y un detector e instrumental electrónico auxiliar, capaz de medir la intensidad de neutrones en una serie de intervalos de tiempo subsiguientes al pulso. Lógicamente, a medida que el intervalo considerado se aleja del instante inicial, la intensidad de neutrones disminuye hasta llegar a cero para un desfase de tiempo suficientemente largo (en el orden de los milisegundos).

La curva de vida de los neutrones se correlaciona luego con ciertas propiedades de la roca. En el rango de los neutrones térmicos la propiedad dominante es la absorción de neutrones por captura la cual resulta interesante para distinguir agua salina (un fuerte absorbente) del agua dulce o del petróleo.

Para neutrones rápidos la propiedad determinante es el poder de termalización que depende principalmente del contenido de hidrógeno.

### REFERENCIAS

- 1.- Castagnet, A.C., Lorenzetti, J.R., Gillen, R.J., "Telemedición digital, por atenuación gamma, del nivel y densidad de líquidos almacenados en tanques", Publicación interna CNEA, EN-7/14, marzo 1969, BuenosAires.
- 2.- Castagnet, A.C., Gillen R.J., Lazor C.J., "Ensayos y calibración en laboratorio, del medidor de nivel y densidad de líquidos", Publicación interna CNEA EN-16/36, septiembre 1970, Buenos Aires.
- 3.- Castagnet, A.C., "Registro automático del espesor de nieve por radiografía - Contrato OIEA 306/R1/RB - Informe final". Publicación interna CNEA EN-4/10 noviembre 1968, Buenos Aires.
- 4.- Castagnet, A.C., et al, "Medición de densidad por retrodispersión gamma: bases para el diseño de equipos aplicables a suelos y otros materiales", Informe CNEA No. 137, 1965, Buenos Aires.
- 5.- Schlumberger, "Log interpretation principles", Document, Schlumberger Ltd, New York, 1969.
- 6.- Wahl J. S., Tittman J., Johnstone C. W., "The dual spacing formation density log", Jour. Pet. Tech., Dec. 1964.
- 7.- Meyer W. R., "Use of a neutron moisture probe to determine the storage coefficient of an unconfined aquifer", U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 450-E, 1963.

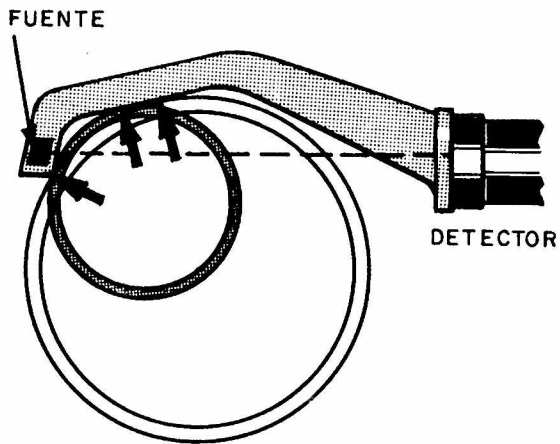


Fig. 1 Medidor de espesor de paredes de caños. La sonda toca dos puntos diferentes del caño, independientemente de su diámetro.

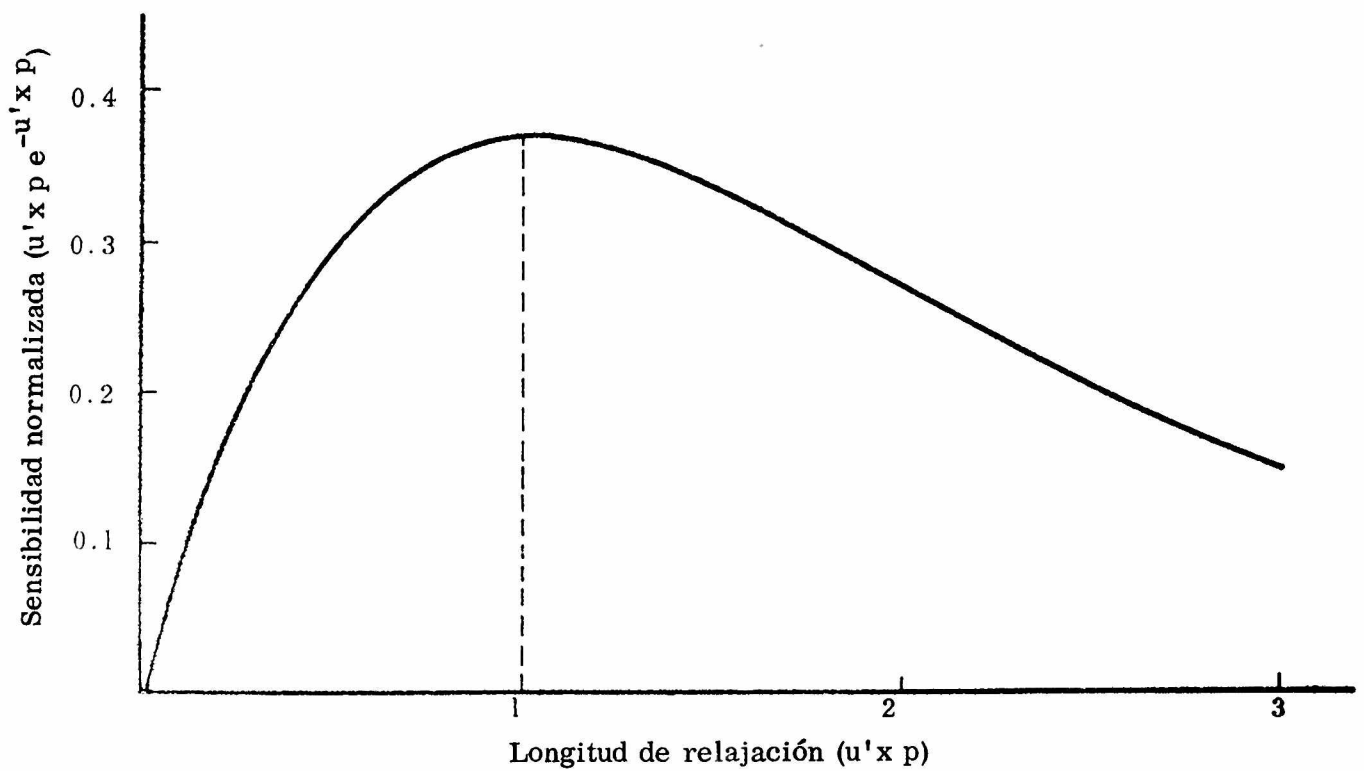
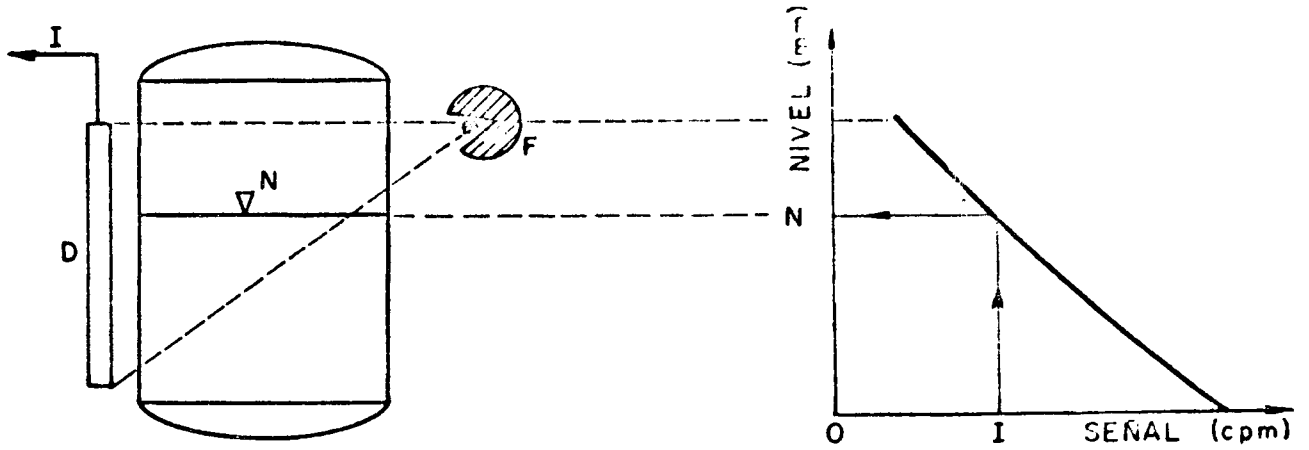
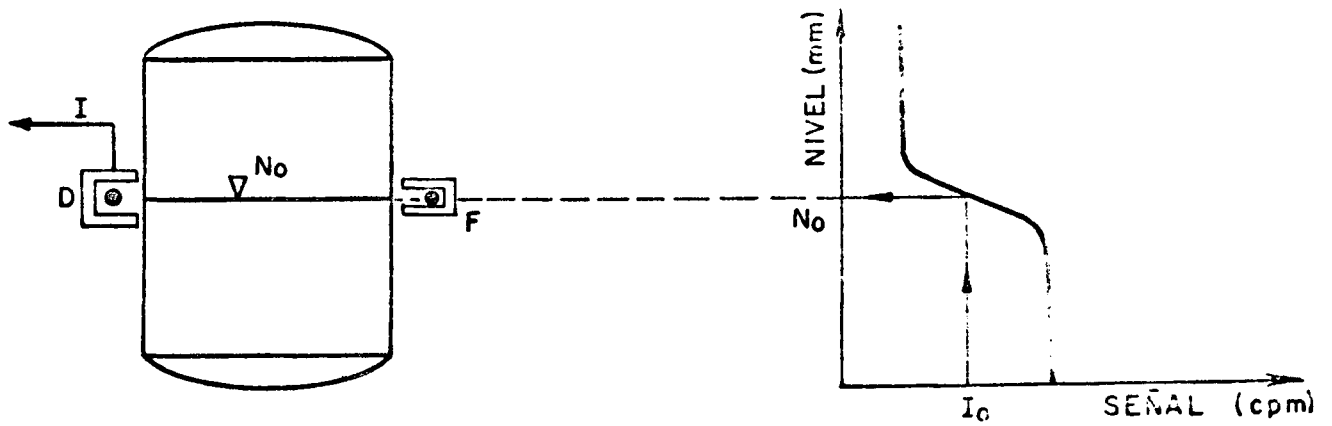


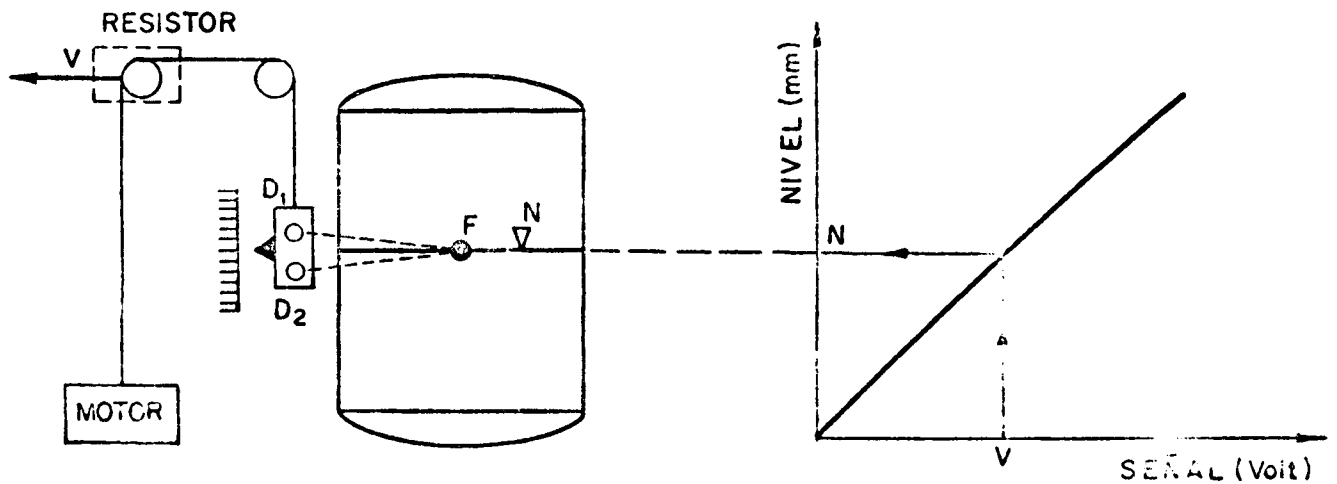
Fig. 2 Sensibilidad normalizada ( $S_n$ ), para la medición de densidad por atenuación gamma, en función del producto  $u' \times p$ .



a) Indicación continua: Se mide y/o registra continuamente el nivel en un amplio rango de variaciones.



b) Control a nivel fijo: La señal  $I_0$  actúa una alarma y/o control automático de llenado o vaciado del tanque cuando se llega al nivel  $N_0$ .



c) Seguidor de nivel: La sonda sigue automáticamente a la fuente flotante  $F$  proveyendo indicación visual del nivel al pie del tanque o a distancia mediante un resistor variable.

Fig. 3 DIFERENTES METODOS DE MEDICION DE NIVEL.

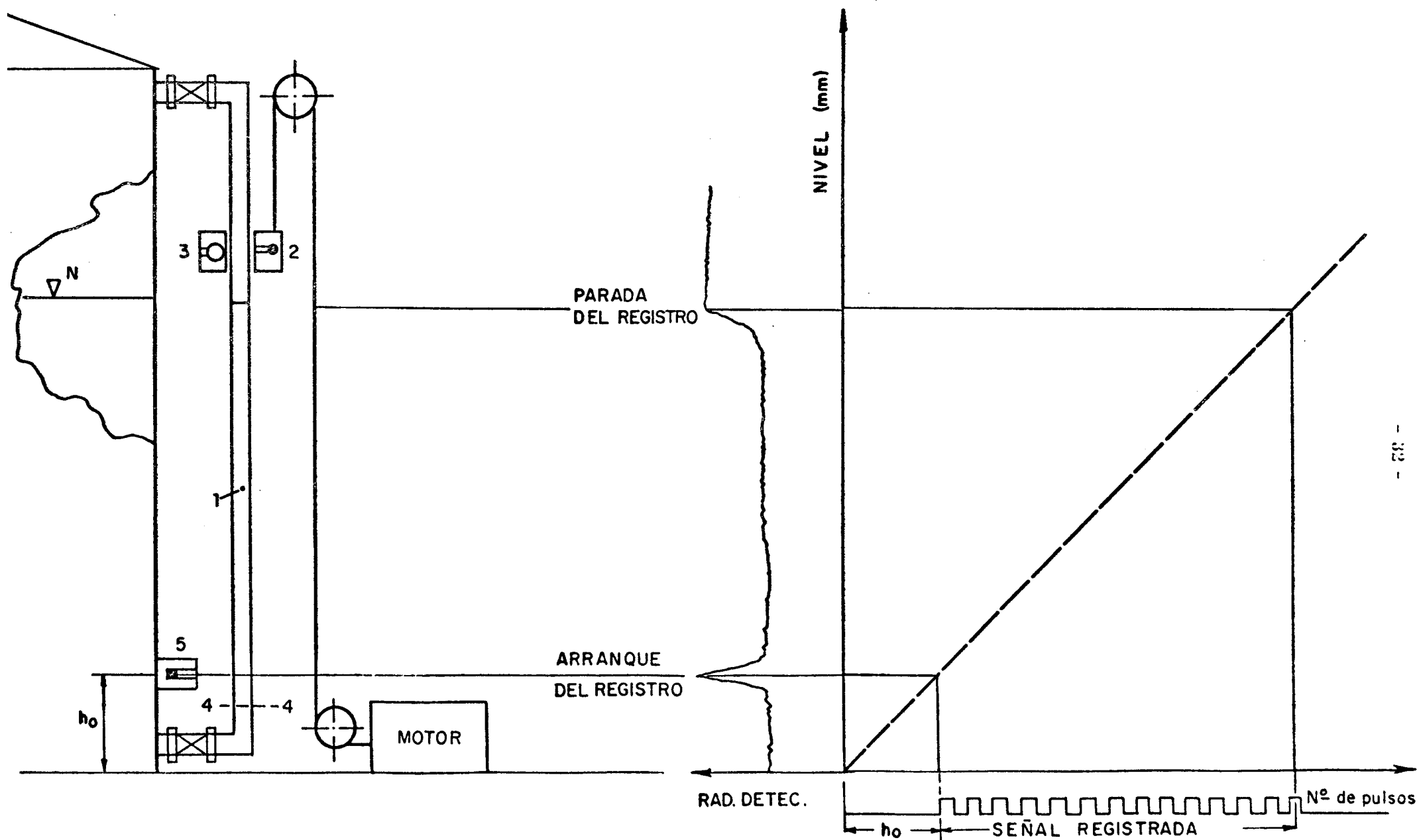
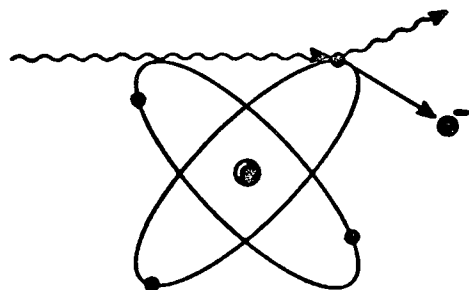


Fig. 3 d) TELEMEDIDOR DE NIVEL Y DENSIDAD DESARROLLADO EN LA CNEA.

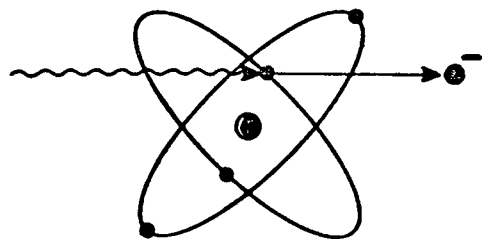
(1) Tubo de comunicación lateral; (2) fuente; (3) detector; (4-4) posición de reposo; (5) fuente auxiliar.

**Fig.4 INTERACCION DE RAYOS GAMMA**



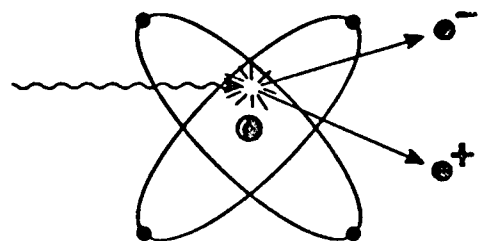
### **EFEECTO COMPTON**

- RAYO  $\gamma$  DE MENOR ENERGIA  
PROSIGUE EN OTRA DIRECCION
- ELECTRON ES EYECTADO CON  
LA DIFERENCIA DE ENERGIAS



### **ABSORCION FOTOELECTRICA**

- RAYO  $\gamma$  COMPLETAMENTE ABSORBIDO
- ELECTRON EYECTADO CON LA ENERGIA  
DEL RAYO  $\gamma$  MENOS LA ENERGIA DE UNION



### **PRODUCCION DE PARES**

- RAYO  $\gamma$  ANIQUILADO
- CREACION DE ELECTRON Y POSITRON  
COMPARTIENDO ENERGIA  $\gamma$  MENOS 1,02 MeV

USAEC-ID-216A

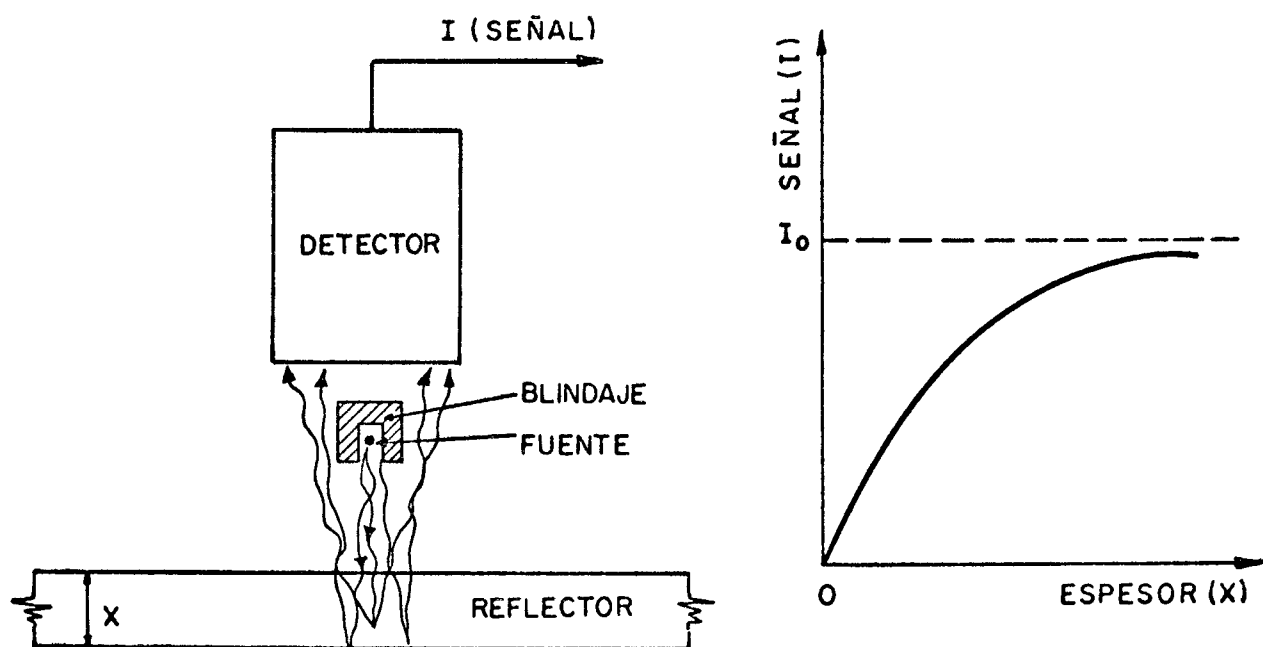


Fig. 5 MEDICION DE ESPESOR POR RETRODISPERSION GAMMA. La señal aumenta con el espesor hasta un valor de saturación.

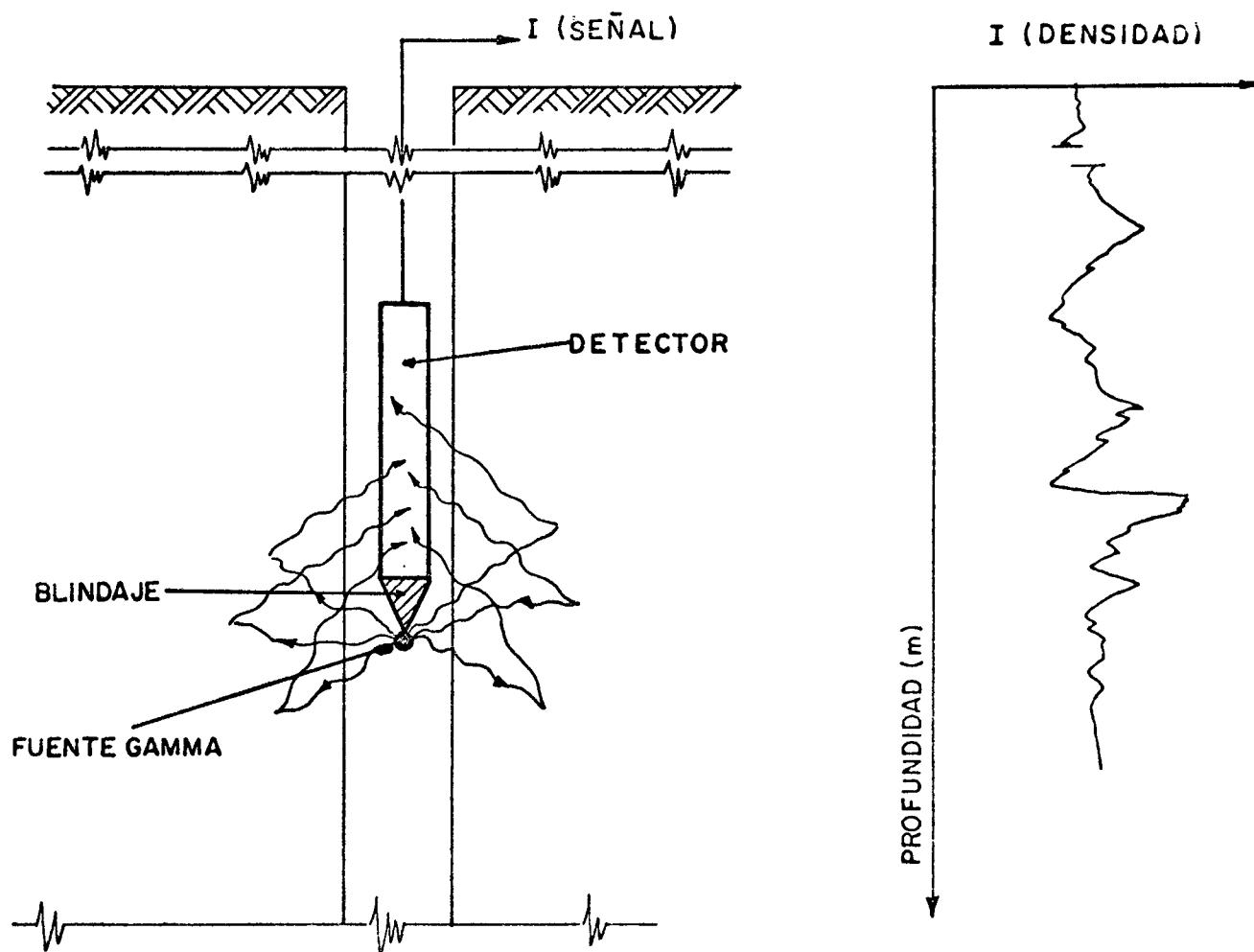


Fig. 6 MEDICION DE DENSIDAD DE SUELOS EN PROFUNDIDAD POR RETRODISPERSION GAMMA. La señal puede aumentar o disminuir con la densidad, según la separación entre fuente y detector.

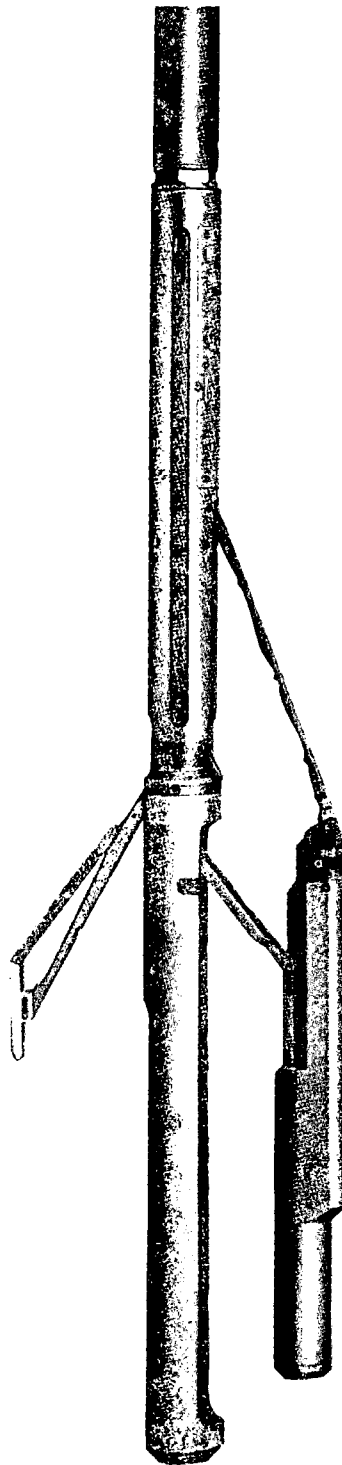
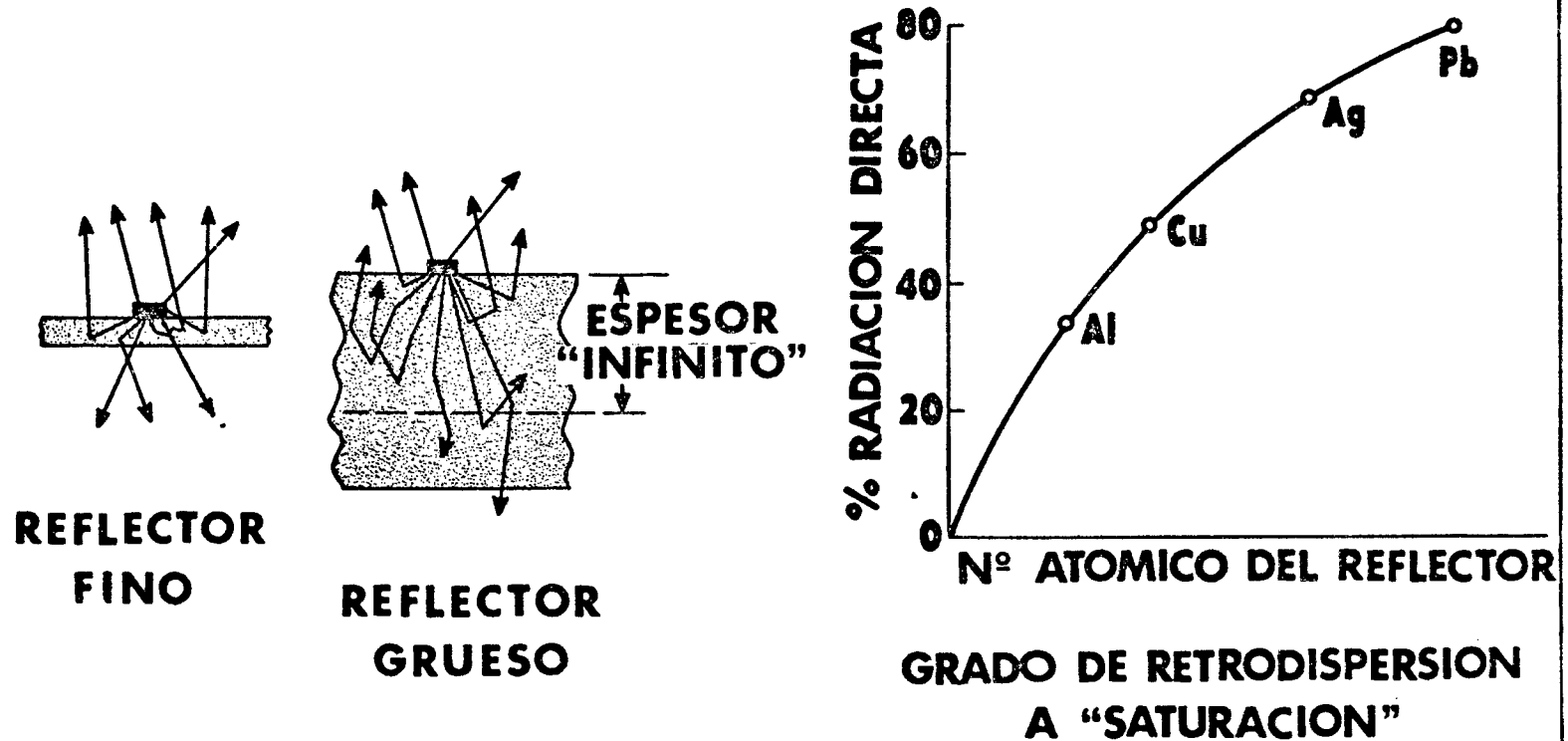


Fig. 7 Sonda nuclear para medición de densidad de suelos (derecha) com  
binada con calibre de diámetro, en la misma herramienta de perfilaje de pozos.



**Fig.9 RETRODISPERSION BETA**



- . LA RETRODISPERSION AUMENTA CON EL ESPESOR Y Nº ATOMICO DEL REFLECTOR
- . OCURRE "SATURACION" PARA ESPESOR "INFINITO" (APROX. 1/2 DEL RANGO MAXIMO)

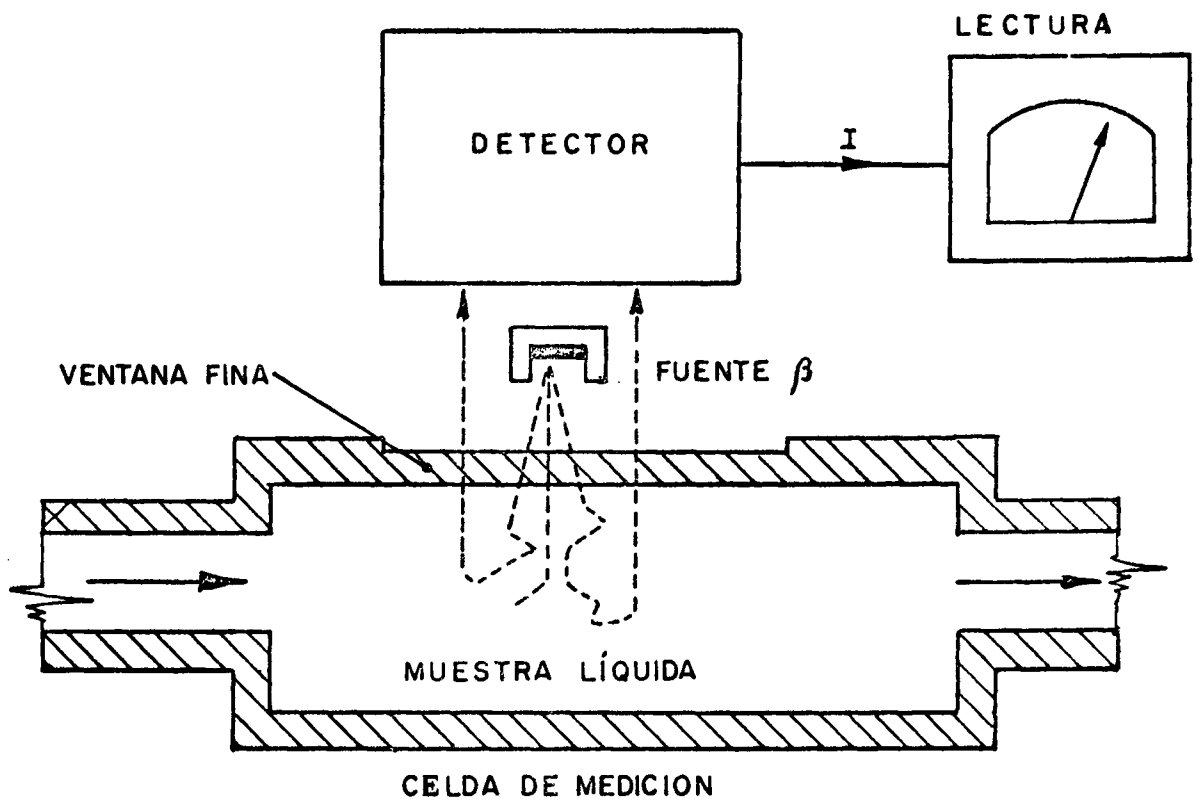


Fig. 10 MEDICION DE CONCENTRACION POR RETRODISPERSION BETA.

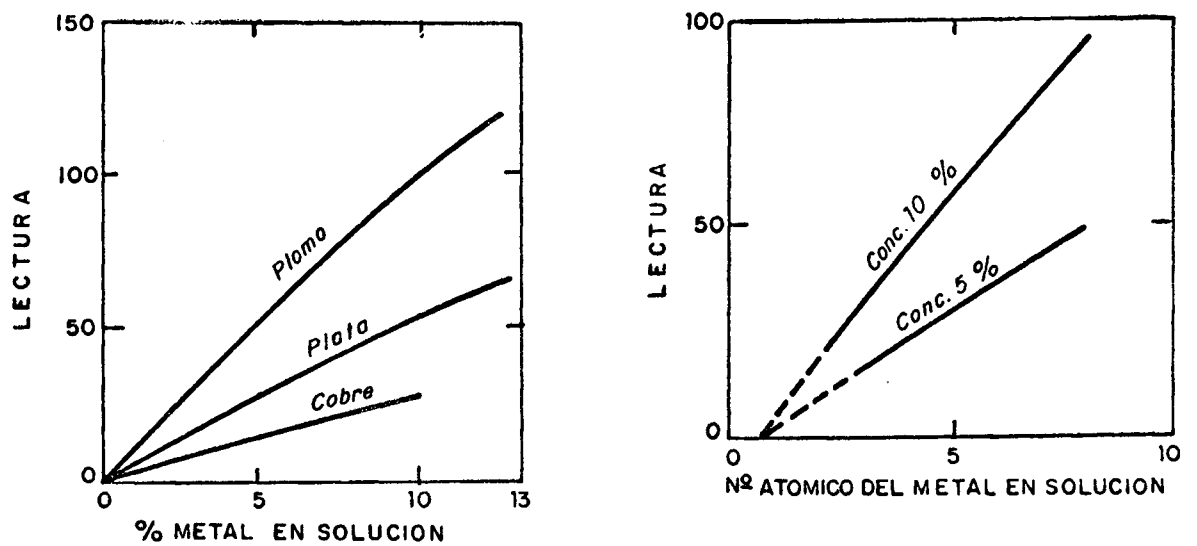


Fig. 11 RETRODISPERSION BETA EN FUNCION DE LA CONCENTRACION Y EL NUMERO ATOMICO DEL METAL EN LA SOLUCION.

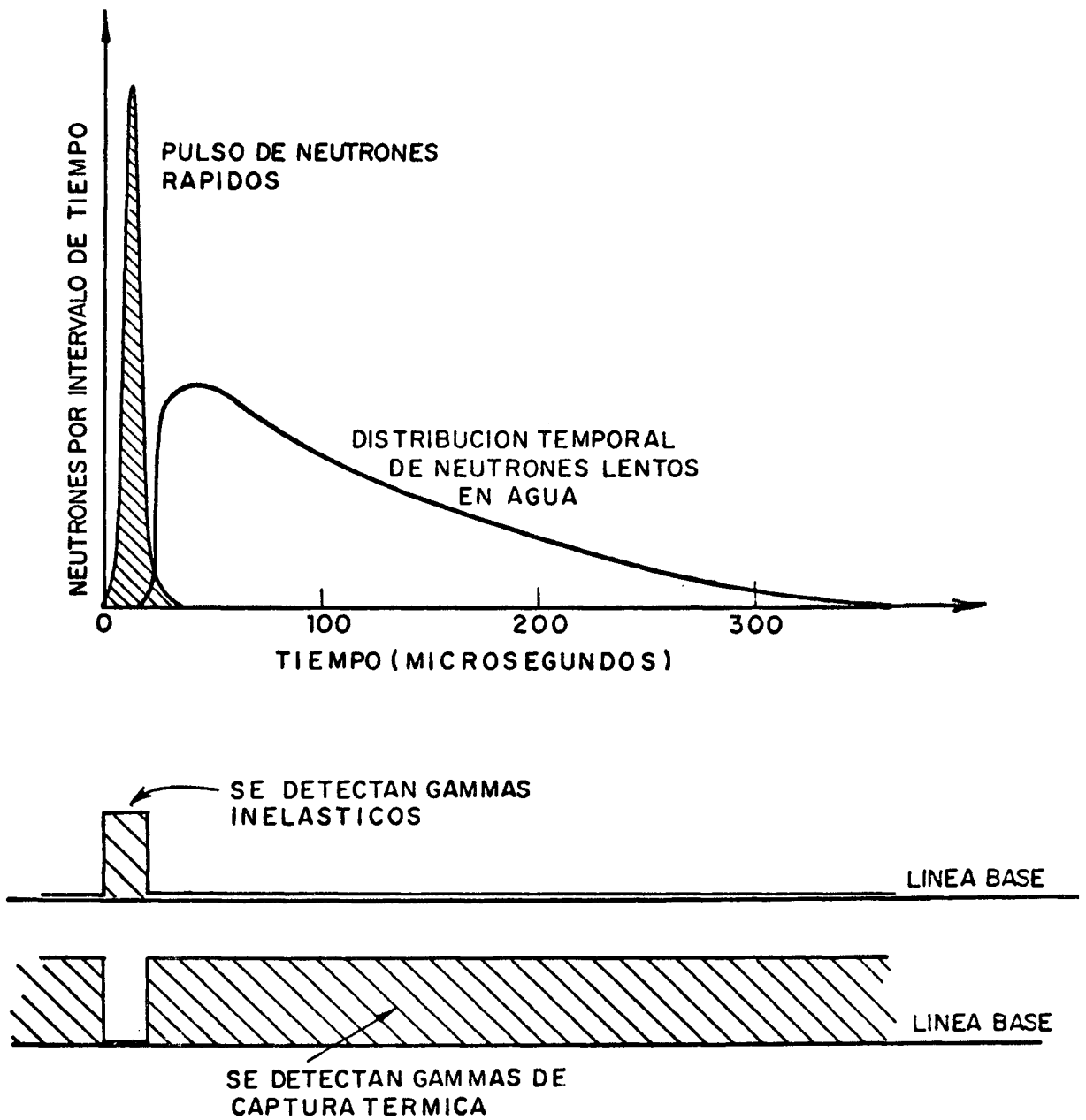
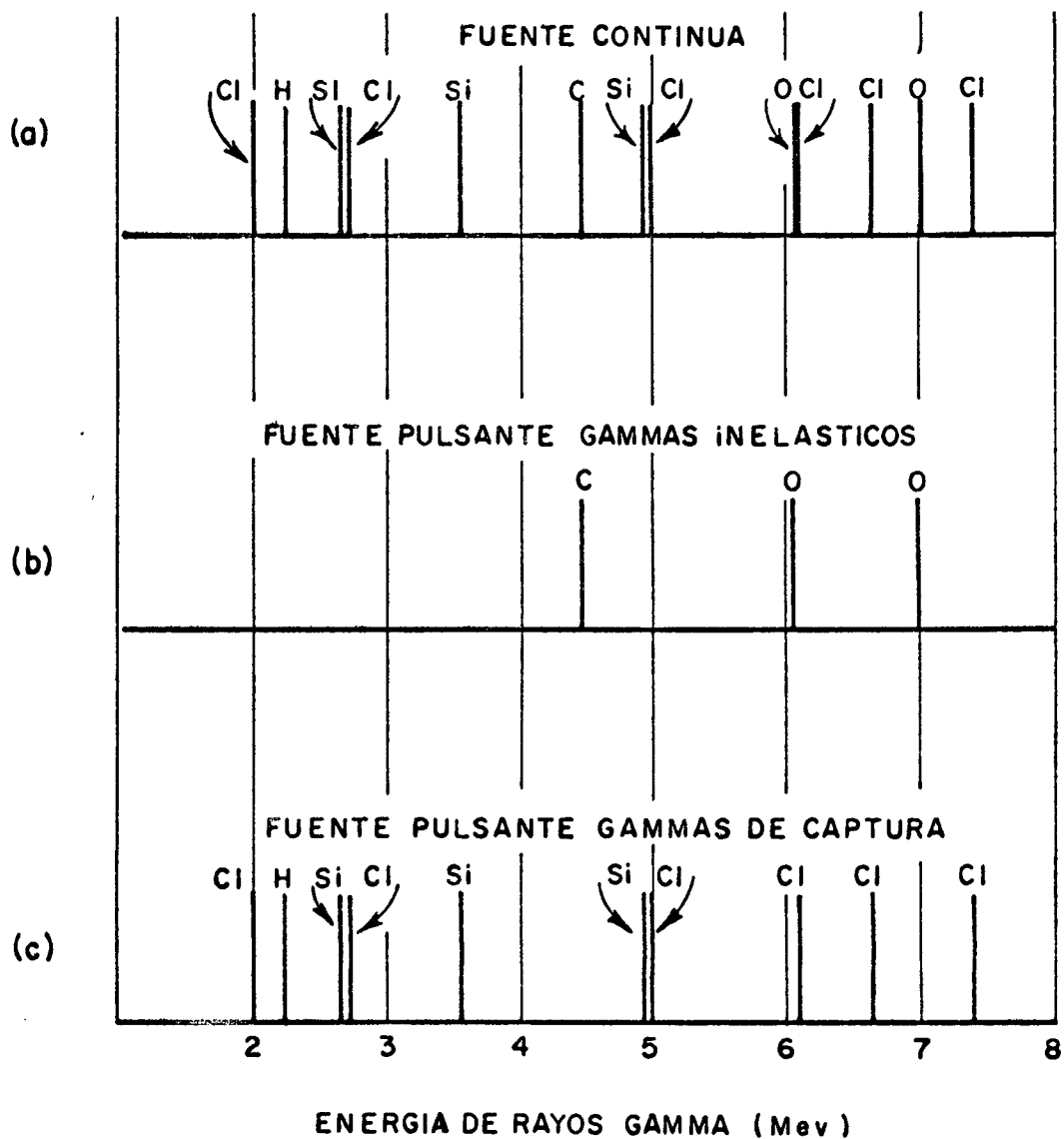


Fig. 12 OPERACION DE UNA FUENTE PULSANTE DE NEUTRONES Y SECUENCIAS DE DETECCION GAMMA.



**Fig. 13 RAYOS GAMMA PRODUCIDOS EN ARENA CON AGUA SALADA Y PETROLEO, POR BOMBARDEO DE NEUTRONES RAPIDOS.**