

05.78.13



COMISION INTERAMERICANA DE ENERGIA NUCLEAR Y
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA DE LA REPUBLICA ARGENTINA



**CURSO LATINOAMERICANO DE CAPACITACION
PARA LA PROSPECCION Y EXPLORACION
DE YACIMIENTOS URANIFEROS**

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 1	AÑO 1978

CNEA-AC-14/78

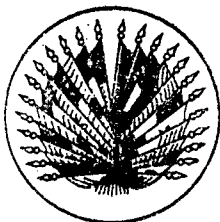
III. METODOS DE PROSPECCION URANIFERA

2. INSTRUMENTAL RADIMETRICO
PRINCIPIOS Y OPERACIONES

RAUL A. OLSTEIN
Y
JORGE A. MUSET

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

BUENOS AIRES
OCTUBRE 1978



COMISION INTERAMERICANA DE ENERGIA NUCLEAR Y
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA DE LA REPUBLICA ARGENTINA



CURSO LATINOAMERICANO DE CAPACITACION PARA LA PROSPECCION Y EXPLORACION DE YACIMIENTOS URANIFEROS

CONFERENCIA III-2

INSTRUMENTAL RADIMETRICO - PRINCIPIOS Y OPERACIONES

RAUL A. OLSTEIN

Y

JORGE A. MUSET

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

1. INTRODUCCION

Con esta conferencia se pretende poder transmitir a los concurrentes los principios en que nos basamos desde el punto de vista electrónico para fijar las pautas a tener en cuenta en la detección de minerales radiactivos.

El descubrimiento por Roentgen de los rayos X en 1895 condujo a que Becquerel descubriera en 1896 la radiactividad. Este comprobó que ciertas especies minerales emitían permanentemente una radiación tan penetrante como los rayos X, capaces de impresionar placas fotográficas, de provocar fluorescencia de ciertas sustancias, de ionizar gases, de liberar energía, de atravesar algunos espesores de materia, etc.

Desde ese entonces, investigadores de la talla de Curie, Fermi, etc, nos han dejado un conocimiento amplio de ese fenómeno que se llama radiactividad. Convendrá recordar que es y como se produce.

El átomo de cualquier elemento está constituido por un núcleo integrado por partículas pesadas que se denominan protones y neutrones en atención a su respectiva carga eléctrica. De hecho entonces que los núcleos quedan con cargas positivas (debido a sus protones), lo que hace que se rodeen naturalmente de electrones (tantos como protones tengan) estableciéndose un equilibrio eléctrico.

La casi totalidad de la masa del átomo se encuentra en el núcleo ya que los electrones son 1/1850 veces más livianos que el protón. En contraste, el núcleo tiene un volumen muy pequeño (del orden de 10^{-12} cm).

Hay tantos tipos de átomos como de núcleos y se denomina nucleído a cada uno de ellos.

Entre los nucleídos es necesario distinguir los estables de los inestables ya que éstos últimos, en un momento dado y sin acción exterior, pueden transformarse, desintegrarse, originando nuevos nucleídos hasta alcanzar la estabilidad.

Puesto que muchos núcleos son estables, es necesario que existan fuerzas de atracción entre los neutrones y los protones. Si bien estas fuerzas no se conocen exactamente parecería que obedecen a un canje de energía.

Además existen fuerzas de repulsión coulombianas entre los protones, cuyas consecuencias veremos enseguida.

Si solamente se consideran las fuerzas de atracción entre los neutrones y protones, cualquier canje de energía entre ellos alcanzará un valor máximo cuando se encuentren en igual cantidad. Sin embargo y puesto que los protones se repelen, es necesario que se presenten una tendencia hacia la disminución de estas fuerzas por reducción del número de protones. Un exceso o diferencia en el número de neutrones debe ser causa de inestabilidad y cuanto mayor sea la desviación de la relación N:P, tanto mayor será la inestabilidad del núcleo.

2. EMISION

La inestabilidad de los núcleos se puede relacionar con su tendencia a reajustar relaciones desfavorables Neutrón/Protón (que para los estables es igual a 1), dándoles valores más próximos a la unidad. Los núcleos con número excesivo de neutrones realizan ese ajuste aumentando su carga nuclear mediante emisión de partículas alfa o beta.

2.1. EMISION DE PARTICULAS ALFA

En este tipo el núcleo madre emite una partícula alfa, dando lugar a la formación de núcleo hija. La emisión alfa tiene lugar en los elementos naturales de números atómicos (Z) mayor que 82, con algunas excepciones en la zona de las tierras raras.

Las partículas alfa son núcleos de helio como fue anunciado en 1903 por Ramsay y Soddy, y demostrado experimentalmente por Rutherford y Royds. Están constituidos por dos protones y dos neutrones, presentando por lo tanto dos cargas positivas, de ahí que el núcleo hija posea un número atómico (Z) dos unidades menor que el núcleo madre, y un número de masa (A) cuatro unidades menor.

Se define al número atómico como: El número de orden del elemento en el sistema periódico y expresa al mismo tiempo, el número de electrones o de protones del elemento.

Número de masa: Es la masa de un isótopo determinado, número de protones más neutrones.

Número de neutrones del núcleo: Es igual al paso atómico menos el número de protones.

Además en el choque con un electrón no resulta mayormente desviada, por lo cual las partículas alfa presentan trayectorias que se aproximan a líneas rectas.

El poder de penetración en el aire es de aproximadamente 6 centímetros y en sólidos comunes como el aluminio, papel o tejidos animales es solamente aproximado de 30 a 40 micrones.

2.2. EMISION DE PARTICULAS BETA

Si la relación de neutrones o protones de un núcleo es mayor o menor que lo que corresponde a la estabilidad en la zona de la tabla a la cual pertenece, se desintegra por emisión beta.

La desintegración beta puede ser negativa o positiva. En el primer caso se emite una partícula beta negativa que es un electrón similar a los orbitales pero dotado de mayor velocidad. En el segundo caso se emite un positrón, una película que tiene una masa y carga en valor absoluto igual al del electrón pero de signo positivo.

Después de una o varias desintegraciones beta, el núcleo alcanza la estabilidad.

Las partículas beta abandonan el núcleo con una velocidad aproximadamente igual a la de la luz y su recorrido en el aire es del orden de varios metros y en el aluminio de algunos milímetros. Son por lo tanto mucho más penetrante que los rayos alfa, pero en oposición, debido a su menor masa, su poder de ionización de gases es considerablemente menor.

2.3. EMISION DE RADIACIONES GAMMA

La desintegración puede ir acompañada por emisión de radiaciones gamma que son ondas electromagnéticas, similares en todas sus propiedades físicas a los rayos X. La diferencia fundamental entre ambos radica en que mientras los rayos X tienen su origen en las órbitas electrónicas, los rayos gamma se emiten como resultado de una reordenación espontánea de los nucleones.

Otra diferencia menos esencial es su distinta energía. Tienen gran poder de penetración, pudiendo decir que la radiación gamma atraviesa aproximadamente 100 metros de aire y varios centímetros de metales y sólidos.

La radiación gamma tiene tres formas principales de interactuar con la materia, que dan origen a tres efectos en competencia:

1°) Efecto fotoeléctrico

En este proceso, toda la energía $E_\gamma = h\nu$ del fotón incidente, es transferida a un electrón unido al átomo, el cual es separado del mismo con una energía cinética $E_e = h\nu - W$, siendo W la energía de enlace del electrón emitido en su órbita de origen. De esta manera, el rayo γ desaparece y se emite un electrón. Generalmente son emitidos electrones de la capa K o L. Debido a esto se produce emisión de rayos X característicos.

El electrón puede ser emitido fuera del absorbente o, si el absorbente no es muy delgado, ser reabsorbido casi inmediatamente debido al corto alcance de un electrón en un sólido.

Los electrones se emiten en todas direcciones pero la emisión es nula en la dirección de la radiación incidente. Si colimamos el haz aquellos rayos que sufrieron efecto fotoeléctrico no llegan al detector.

2°) Efecto Compton

Un rayo gamma choca con un electrón y le transfiere parte de su energía. El resultado es la salida de un electrón y un rayo gamma de menor energía que el rayo incidente.

Los electrones salen en todas direcciones con energías variables. El rayo gamma también es desviado de su dirección inicial, por lo tanto, para un haz colimado, no llegan rayos al detector. Se produce aquí también emisión de rayos X característicos.

3°) Formación de pares

Al pasar un rayo gamma cerca de un núcleo, se materializa en un par: un electrón y un positrón, los que salen con una energía en que se cumple. (Fig. 1).

$$E_{\gamma} = 2m_0 c^2 + E^+ + E^-$$

Si se tiene un haz constituido por rayos gamma de la misma energía la probabilidad de que se produzca más un efecto que otro dependerá de la energía de la radiación y de la naturaleza del material absorbente.

A bajas energías de fotones, por debajo de 50 Kev en Al y 500 Kev en Pb, el efecto fotoeléctrico es el que tiene mayor proyección.

A más altas energías baja sensiblemente el efecto fotoeléctrico.

Cuando las energías son mayores de 1,02 MeV tiene también importancia la formación de pares. Es decir que si tenemos un cierto haz de rayos gamma de energía mayor que 1,02 MeV, algunos rayos sufrirán efecto fotoeléctrico, otros efecto Compton y otros formación de pares.

La interacción de los rayos gamma con la materia, es marcadamente diferente de la interacción de las partículas cargadas.

La diferencia que resalta es el mayor poder de penetración de los rayos gamma.

Presentan, lo mismo que los rayos X, una absorción exponencial característica en la materia y no tienen un alcance definido como el que presentan las partículas cargadas. Las partículas cargadas, especialmente las pesadas, pierden su energía durante el curso de un gran número de colisiones con electrones. La partícula gradualmente se acerca más lentamente hasta que se detiene.

ne y es absorbida.

En cambio, en el caso de rayos gamma, cada fotón que sufre un proceso fotoeléctrico es separado del haz por una sola colisión; en el efecto Compton es desviado por un solo choque y en la formación de pares, las dos partículas formadas salen desviadas respecto de la dirección inicial del rayo gamma.

Si colimamos un haz, la energía de los rayos que logran llegar al detector es la misma que la de los rayos iniciales.

El número de fotones primarios que se pierden por los tres procesos (dN) en una pequeña longitud de trayectoria dx es proporcional al número N presente:

$$\frac{dN}{dx} = -\mu N, \text{ que integrada resulta}$$

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

donde $\mu = \zeta + K + \delta$, es el coeficiente de absorción lineal total para la radiación primaria; está expresado en 1/cm.

x es el camino recorrido y está expresado en cm

ζ , K , δ , son los coeficientes de absorción lineales para el efecto fotoeléctrico, formación de pares y efecto Compton, respectivamente.

Quando escribimos:

$$\frac{dN}{dx} = -\zeta N - KN - \delta N \quad (a)$$

indicamos la disminución que sufre el haz en un cm de su trayectoria. Ese valor N que aparece en la expresión se refiere al haz primario, pero se producen otras radiaciones secundarias: al fenómeno fotoeléctrico siguen rayos X; al de pares, la radiación de aniquilamiento y el Compton da lugar a electrones y fotones dispersos.

De ahí que para comprobar la validez de (a) hay que colimar también el haz.

Eliminar rayos del haz inicial equivale a que éste pierda energía, la que es entregada al material absorbente.

Las magnitudes de los coeficientes de absorción ζ , K , y δ , dependen de la energía de las radiaciones y de la naturaleza del absorbente. (Figs. 2 y 3).

Un valor bastante utilizado es el llamado semi-espesor.

Es común hallar gráficos, en los que en ordenadas se indica la energía de los fotones y en abscisas los espesores de Al o Pb que reducen la exposición a la mitad.

$$d \frac{1}{2} = 0,693/\mu$$

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

Esta fórmula también puede escribirse

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) d}$$

Siendo $\frac{\mu}{\rho}$ el coeficiente de absorción másico, expresada en cm^2/g y d la densidad superficial del absorbente en g/cm^2 .

3. DESINTEGRACION RADIATIVA

Como ya se anticipó el fenómeno mediante el cual el núcleo de un átomo se transforma espontáneamente en otro recibe el nombre de desintegración radiactiva.

En cada desintegración el núcleo pierde aproximadamente una milésima parte de su masa en forma de radiación. Algunos núcleos mediante una sola desintegración alcanzan la estabilidad, se transforman en núcleos estables; otros necesitan sufrir sucesivas desintegraciones.

Al nucleído que sufre la desintegración se le suele llamar nucleído madre y al producto nucleído hija.

Los núcleos pueden desintegrarse por distintos mecanismos, emitiendo en cada caso distintos tipos de radiaciones o partículas (partículas alfa, partículas beta y radiaciones electromagnéticas).

El tiempo que debe transcurrir para que un número estadísticamente significativo de átomos de un nucleído se reduzca a la mitad, mediante desintegraciones radiactivas, se denomina período (T).

Existe otra constante también utilizada en radiactividad, llamada constante de desintegración radiactiva (λ) y que está relacionada matemáticamente con el período de desintegración por la siguiente relación:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{T}$$

La ecuación del fenómeno de desintegración radiactiva es:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N$$

donde $\frac{dN}{dt}$ es la velocidad de desintegración y N es el número de átomos radiactivos.

Si se integra la ecuación fundamental para $N = N_0$ en el instante $t = 0$ resulta:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

operando

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$\text{para un tiempo } t = T = \frac{0,693}{\lambda} = \frac{N}{N_0} = \frac{1}{2}$$

lo que significa que la cantidad de átomos inestables se ha reducido a la mitad.

El número de desintegraciones que sufre un núcleo se expresa en Curie, unidad que equivale a la cantidad de material radiactivo en que se produce $3,7 \times 10^{10}$ de ellas por segundo, estando referido a la actividad de 1 gr. de radio (aproximadamente).

Resultando una cantidad significativamente grande, es común que se utilicen los submúltiplos milicurie (mC) o el microcurie (μC).

3.1. DOSIS

Es la energía entregada por un material radiactivo a un volumen determinado de aire o tejido. La unidad es el rotgen (r). Para el aire se demuestra que $1(r) = 87,7$ ergios/g y para agua o tejido 1 rotgen de radiación gamma vale 97 ergios/g.

3.2. INTENSIDAD DE DOSIS (ID)

La intensidad de la dosis está relacionada con la actividad de la fuente radiactiva.

$$\text{ID. (mr/h)} = \frac{K(\text{mr/h/mc cm}) \cdot c(\text{mc})}{d^2(\text{cm})}$$

conde K es la intensidad de dosis proporcionada por una fuente de 1 mc. a 1 cm de distancia. Este valor de K es diferente y característico para cada sustancia y se encuentra tabulado en manuales especiales.

Vemos que la expresión anterior, que la intensidad de dosis es proporcional a la actividad de la fuente e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa a ésta del punto de medición.

Debe destacarse que la aplicación de ésta expresión tiene validez mientras pueda considerarse la fuente puntual, sea porque realmente su tamaño es pequeño o porque siendo discreta, sea grande la distancia considerada.

4. MAGNITUDES Y UNIDADES RADIATIVAS

4.1. ENERGIA

Definida en física como la capacidad que tiene un cuerpo o sistema

para producir trabajo se mide en el sistema c.g.s. en ergios y en el m.k.s. en Kg.

En física nuclear se usa como unidad de energía el electrón-volt (eV) y se define como la energía que adquiere un electrón que parte del reposo y es acelerado en un campo eléctrico por una diferencia de potencial de 1 voltio. Es una unidad muy pequeña y en consecuencia son de uso frecuente los múltiplos de ella:

el Kilo electrón-volt(kev) y el megaelectrón-volt(MeV).

1 eV(electrón-volt)= $1,602 \times 10^{-12}$ ergios ó 1 ergio= $0,624 \times 10^{12}$ eV

1 keV(kilo electrón-volt)= $1,602 \times 10^{-9}$ ergios.

1 Mev(Millón de electrón-volt)= $1,602 \times 10^{-6}$ ergios.

5. INSTRUMENTAL

Hasta aquí se ha procurado dar una idea de radiactividad, de las partículas radiactivas, de las radiaciones electromagnéticas, etc que son los elementos con que se debe desenvolverse la prospección uranífera para alcanzar su objetivo.

A la electrónica le corresponde brindar los medios para que aquellos elementos sean detectables y medibles, siendo en consecuencia el componente intermedio entre las pautas radiactivas y el prospector o el analista, o el evaluador de misnas. Le corresponde pues el desarrollo del instrumental que explotando alguna de las particularidades de las radiaciones cubran aquel vacío y a la vez se adecúen a las necesidades del destinatario en materia de peso y volumen.

El instrumental que se emplea debe ser confiable, asegurando una medición rápida, correcta y definitiva. La repetibilidad que reciban debe caer en la ley de Gauss.

Pasaremos ahora a detallar elementos capaces de reaccionar ante la incidencia de una emisión radiactiva alfa, beta gamma permitiendo su detección y frecuencia.

5.1. DETECCION DE PARTICULAS ALFA

La electrónica moderna se ha basado en los viejos descubrimientos de las propiedades características de esta partícula, para desarrollar los detectores alfa en uso actualmente.

Al hablar antes de esta radiación, se dijo que poseía carga eléctrica positiva y gran poder ionizante. Ahora se puede agregar que al chocar con una pantalla de sulfuro de zinc produce un destello, algo que Rutherford ya había comprobado. Así pues los detectores de partículas alfa se agrupan ya sea en centelladores o en cámara de ionización.

En el primer caso, el destello producido por el impacto alfa-sulfuro

de zinc activado con plata es "visto" por un fotomultiplicador que lo convierte en cascada de electrones medible electrónicamente. En el segundo, la partícula alfa ioniza el aire de una cámara y produce la descarga de un electrómetro de manera proporcional a la concentración (cantidad) de ellas. Como se verá más adelante, una variación de ésta la constituyen los conocidos tubos de Geiger-Müller, en los que el aire es reemplazado por un gas.

5.2. PARA LA DETECCION DE PARTICULAS BETA

La detección de partículas beta, puede hacerse por centelleo, utilizando un monocristal de antraceno o plásticos como el poliestireno o el polivinil-tolueno. Si bien el método más empleado hasta ahora es el tubo Geiger-Müller ya citado.

5.3. DETECCION GAMMA

La radiación gamma puede detectarse aprovechando su característica de producir destellos al entrar en colisión con el ioduro de sodio activado con talio, o la de ionizar ciertos gases.

Estas características marcan la línea de los detectores en uso: por centelleo o por tubos Geiger Müller.

6. DETECTORES

Se describirán ahora los elementos detectores de uso corriente en las tareas radimétricas.

6.1. TUBOS GEIGER MULLER (G.M.) (Fig. 4)

Es el tipo más conocido de detector de radiaciones y dentro de sus limitaciones, es capaz de responder a partícula alfa, beta y radiación gamma. El principio según el cual opera el tubo G.M. es el siguiente: si a una cámara de ionización o un contador proporcional se le aumenta la tensión aplicada a sus electrodos hasta llegar a las vecindades del valor del potencial de ionización del gas en cuestión, la corriente de ionización, cuando entra una radiación ionizante, crece muy rápidamente, hasta el pasaje de una descarga disruptiva de gran intensidad. La amplitud de esa corriente no depende de la energía de la partícula detectada, pues es suficiente que comience una escasa ionización inicial para que el elevado campo eléctrico aplicado provoque la descarga descrita. En la construcción real de un tubo G.M. se trabaja con presiones de gas mucho menores que la atmosférica (algunos cm de Hg), con lo que se evita la necesidad de operar con tensiones excesivamente altas. Generalmente constan de un cátodo cilíndrico con un diámetro que normalmente es de 1 a 2 cm y a lo largo de cuyo eje está el ánodo formado por un alambre rígido de tungsteno.

El cátodo puede ser metálico o de vidrio con un revestimiento interior de vapor metálico o grafitado y en todos los casos constituye el tubo propiamente dicho. El espacio interior, donde previamente se ha evacuado el aire, contiene un gas, generalmente helio, neón, argón o mezcla de ellos a una presión relativamente baja. Además, con el objeto de extinguir la descarga cuando ha cesado la ionización inicial, se introduce otro gas, que según su naturaleza, da origen a dos tipos distintos de tubos G.M.: los extinguidos

con vapores orgánicos (formiato de etilo, alcohol etílico o éter) y los extinguidos con un halógeno (cloro o bromo).

Detallamos algunas mezclas típicas de gases para dos tubos G.M. típicos:

a) helio	60 cm de Hg	b) neón 99,9 %)	40 cm de Hg
argón	4,3 cm de Hg	argón 0,1 %)	
formiato de etilo	0,7 cm de Hg	bromo	1 mm de Hg

Generalmente se habla de los dos tipos de tubos como "comunes" y "de halógenos".

Algunas diferencias entre ambos tipos de tubos G.M. son de hacer no tar:

- un tubo con vapor de extinción orgánico queda destruído permanentemente con una tensión excesiva o de signo cambiado, mientras que un tubo de halógeno se inestabiliza momentáneamente pero se recupera en 24 horas.
- la tensión de trabajo de un tubo de halógeno, es del orden de la mitad, a la tercera parte de la tensión de un tubo similar común.

La curva que representa la actividad contada en función de la tensión aplicada, para un tubo G.M. (Fig. 5), muestra que existe una zona prácticamente horizontal llamada meseta o "plateau", donde el conteo no depende prácticamente del potencial de la fuente.

- Largo del plateau entre 100 V y 350 V. Si es menor de 100 V para el caso de nuestros tubos, deberemos desecharlo. No sirve.
- Comienzo del plateau.
- Fin del plateau.
- Los equipos que llevan la alta tensión fija ésta no podrá estar ubicada por debajo del punto d o sea 30V. del comienzo b; ni por arriba del punto e, 30V. al punto c. En caso de que la alta tensión fija (en nuestro caso 900V.) estuviera ubicada entre bd o ec el tubo no podrá ser usado y se guardará para equipos donde podamos variar la alta tensión.

Otra medición que debemos tener en cuenta es la pendiente del plateau.

6.1.1. Verificación del tubo Geiger

Lo primero que debemos hacer con un tubo es obtener su curva de Plateau la cual podemos apreciar en la Fig. 6. El largo de la meseta del plateau es variable de acuerdo al tipo de tubo y se encuentra entre 100 y 350 voltios. El fabricante del mismo especificará cual es la meseta mínima. En el caso de los dos tubos utilizados por nosotros son del tipo 5112 (corto) y el 5106, (largo) ambos deben acusar una meseta de plateau no menor de 100

volt. Otra cosa a tener en cuenta cuando se repara un equipo con tubo geiger es que en éste a medida que envejece, su plateau se va achicando y podemos encontrar que en tubos alimentados con una determinada tensión fija (en nuestro caso con 900 volts) la misma se encuentra fuera de plateau o en un extremo del mismo.

Al hablar de plateau, nos referimos a la característica del tubo geiger que vamos a emplear.

Para determinar esa característica debemos contar con un escalímetro, que será el causante de ir modificando la tensión que el operador irá indicando y a través de su display o indicador visual, se observará las cuentas de radiactividad en un tiempo constante, para distintas tensiones que se aplican y siempre dejando fija la posición de la muestra radiactiva.

Los datos obtenidos los representamos en coordenadas, fijando sobre el eje de ordenadas los impulsos por segundo y en el eje de abscisas los de tensión que se aplica en un tiempo constante.

Obtendremos así una zona plana o meseta dado que a pesar de variar la tensión la cantidad de impulsos por segundo se mantiene prácticamente constante y a los extremos de ella veremos que para cualquier variación de tensión hay grandes variaciones de impulsos por segundo.

El punto de trabajo consiste en dividir en dos la parte plana, y de allí la mitad de la parte derecha, el motivo es que el envejecimiento del tubo va de izquierda a derecha.

En el caso de encontrar tubos con meseta de plateau menor de 100 volts estos deberán desecharse por defectuosos. Si la tensión fija de alimentación (900 volts) no se encuentra por encima de 30 volts del principio de la meseta o 30 volts por debajo del final de la misma dicho tubo no podrá utilizarse en ese equipo debiendo recurrir a otro y el reemplazado guardarlo para equipos donde podamos variar la alta tensión.

Para conocer con qué porcentaje varía la pendiente de un plateau procederemos de la siguiente manera:

- 1°. Tomamos el centro del plateau (punto a).
- 2°. Tomamos desde el punto "a" 50 Volts a cada lado (puntos b y c).
- 3°. Tomamos en el eje de ordenadas la cantidad de impulsos para cada uno de los puntos (a, b, c,) o sea n_1 , n_2 y n_3 .
- 4°. Hallamos la diferencia entre $n_2 - n_1 = \text{delta } n$
- 5°. Dividimos $\frac{\text{delta } n \cdot 100}{n_3} = \text{Pendiente } \%$

$$\frac{n_2 - n_1 \cdot 100}{n_3}$$

Podemos aceptar un tubo cuando su pendiente es menor del 40 %.

6.2. CRISTALES CENTELLADORES

Se trata de cristales de yoduro de sodio, a los que durante su crecimiento se les incorpora una pequeñísima cantidad de talio que distorsiona la red del cristal, dándole la característica de centellear a la temperatura ambiente cada vez que interacciona con él la radiación. Los cristales puros de INa sólo emiten luz a muy bajas temperaturas.

Estos cristales, la mayoría cilíndricos, están cubiertos con una lámina de aluminio, salvo en una de sus bases en la que generalmente se coloca una ventana de vidrio. En la cara interior del aluminio, la que va adherida al cristal, se deposita óxido de magnesio que aumenta la reflexión de la luz hacia el interior del cristal.

Originariamente los centelleos se detectaban en forma visual, pero en la actualidad lo que se hace es transformarlos en pulsos de tensión o de corriente que son registrados.

No sólo se logra el registro de los centelleos, sino la medición de su intensidad. La observación y medida de los centelleos producidos en centelleadores por partículas ionizantes individuales, constituye la base del instrumento llamado contador de centelleo.

7. TUBO FOTOMULTIPLICADOR (Fig. 7)

Está constituido por:

- 1) un fotocátodo
- 2) una serie de blancos para emisión secundaria llamados dinodos.
- 3) un sistema óptico-electrónico, que permite guiar los electrones de un dinodo al vecino que se encuentra a más alto potencial.
- 4) un ánodo, donde es liberada una corriente de electrones que dará origen al pulso de tensión o señal que después de ser amplificado y clasificado será registrado.

La superficie del fotocátodo y de los dinodos suele ser de níquel, recubierto con una capa de cesio-antimonio.

Entre ánodo y fotocátodo se aplican tensiones dependientes de las características del fotomultiplicador (generalmente entre 600 y 1.400 voltios), la que se reparte en partes iguales entre los dinodos. El cátodo generalmente está a tierra.

La tensión está aplicada de tal manera que el primer dinodo está a más alta tensión que el fotocátodo, el segundo dinodo a más alta tensión que el primero, el tercer dinodo a más alta tensión que el segundo y así sucesivamente.

La actuación del fotomultiplicador se basa en el aprovechamiento de la emisión fotoeléctrica y la emisión secundaria de electrones. Se trata de evitar la emisión termoeléctrica y la emisión por acción de campos eléctricos.

La emisión fotoeléctrica no es más que el resultado de la interacción de la radiación electromagnética con la superficie del fotocátodo. Efectivamente, al actuar fotones sobre el fotocátodo pueden producir la salida de electrones; generalmente se necesita que incidan varios fotones para lograr la salida de un electrón.

Un electrón arrancado del fotocátodo es atraído por el primer dinodo debido a que se encuentra a mayor potencial que aquél, el campo eléctrico establecido entre fotocátodo y primer dinodo le imprime a ese electrón suficiente energía como para poder arrancar por lo menos dos electrones, los que a su vez son solicitados por el segundo dinodo. Cada uno de estos dos electrones, sometidos a un campo eléctrico similar, son capaces de arrancar cada uno de ellos dos electrones a su vez.

En resumen si se supone, por un lado, que del fotocátodo sale un electrón, y que éste a su vez arranca del primer dinodo dos electrones y, por otro lado, que la diferencia de potencial entre un dinodo y el siguiente es la misma, se puede concluir que en cada etapa cada electrón arranca dos. De ahí que del primer dinodo saldrán dos electrones, del segundo cuatro, del tercero ocho, del cuarto diez y seis, del quinto treinta y dos, y así siguiendo. El número de electrones que se liberaron en el ánodo será proporcional a una potencia, en la cual la base será el número de electrones arrancados del primer dinodo y el exponente el número de dinodos.

El número de electrones arrancados del primer dinodo depende, a igualdad de las demás variables, de la tensión aplicada al fotomultiplicador.

En condiciones ordinarias de trabajo, por lo tanto, se podrá cambiar la base de la potencia pero no el exponente del factor de multiplicación. Para ello bastará con variar la tensión aplicada al fotomultiplicador.

A mayor tensión aplicada al fotomultiplicador, se logrará mayor multiplicación de electrones, y más se liberarán en el ánodo, y mayor será la señal (pulso).

8. MECANISMO DE FORMACION DE UN IMPULSO ELECTRICO

En la Figura 8 una fuente o batería de diferencia de potencial E , es aplicada a través de un circuito formado por la resistencia de carga R_C y el tubo Geiger Müller.

Lo mismo que se describe para el tubo Geiger Müller es válido para el conjunto cristal-fotomultiplicador cuya resistencia interna está representada por R_i . En la Figura 9 se representa la tensión eléctrica E en un punto cualquiera tal como el indicado en el gráfico. Desde el instante cero hasta t_1 , ningún evento radiactivo llega al Geiger Müller. La tensión en el punto A, que vale E , al no circular corriente por el circuito sigue valiendo E .

En el instante t_1 , una partícula ionizante llega, ioniza el gas del tubo y lo hace conductor. Circulará por el circuito una corriente I , que provoca sobre R_C una caída de potencial $\Delta U - IR_C$.

En el instante t_2 el gas de extinción detiene la ionización, deja

de circular corriente y la tensión en el punto t_2 vuelve a valer E . Se repite lo mismo para el estado t_3 .

Puede verificarse entonces, que cada evento radiactivo que provocó la ionización del gas del tubo se traduce en términos eléctricos en la aparición de una variación $\Delta U = I \cdot R_C$ en la tensión presente en el punto A del circuito. Esa variación de tensión que se corresponde con la llegada de la radiación ionizante al detector se denomina impulso o pulso.

Si al circuito se conecta un dispositivo eléctrico que produzca raciones permanente de ΔU o de pulsos tendremos representado el evento radiactivo.

La figura 10 como dijimos anteriormente es válida para el caso de cristal de centelleo-fotomultiplicador, sólo que ahora la amplitud de los pulsos sucesivos dependerá de la corriente anódica.

8.1. ESPECTRO DE ENERGIA

Los pulsos generados pueden ser registrados ya sea en forma total o en forma discriminada.

En el primer caso se contabilizan todos los pulsos cualquiera sea su energía (comprendida entre 0,2 y 2,8 MeV aproximadamente) mientras que en el segundo pasan por una etapa discriminadora que selecciona qué rangos de energía se quiere contabilizar.

Los discriminadores actúan como filtros electrónicos, como verdaderos cedazos, que permiten decidir que impulsos (de acuerdo a su tamaño) serán registrados y cuales no. En otras palabras analiza y clasifica los pulsos de acuerdo a su tamaño.

Los equipos monocanales pueden funcionar con uno o dos discriminadores. Cuando funcionan con dos discriminadores se dice que están operando como espectrómetros. Cuando funcionan con un solo discriminador se dice que están operando con discriminador simple o integral.

Mediante un espectrómetro se puede obtener un espectro diferencial porque ya que tanto la etapa amplificadora como el control de ganancia son lineales, el espectro obtenido a la salida del amplificador es similar al de la salida del fotomultiplicador con la diferencia que los impulsos han sido multiplicados por un factor comprendido entre 100 y 1.000.

Con un equipo en el que actúa un solo discriminador, sólo se pueden obtener espectros integrales como se verá más adelante.

Veremos como realizan la clasificación de pulsos los discriminadores.

En la Figura 11 se observa un tren de pulsos distribuidos en el tiempo a la salida del control de ganancia.

Cuando el equipo funciona con un solo discriminador se pueden elegir algunas variantes. La más usual consiste en mantener constantes la tensión

aplicada al fotomultiplicador y el control de ganancia durante el desarrollo del trabajo, e ir variando la tensión de base (umbral) del discriminador. En esa forma sólo pasarán al sistema de registro aquellos impulsos cuya tensión supere la del umbral del discriminador. En este caso se dice que el equipo funciona con discriminador integral y lo que se obtiene mediante el equipo funcionando en esas condiciones recibe el nombre de espectro integral.

Si el discriminador se ubica en el nivel más bajo (cero por ejemplo) serán enviados al sistema de registro todos los impulsos (los representados en la Fig. 11).

Si el umbral se ubica en 1 unidad de tensión, sólo pasarán aquellos impulsos cuyo tamaño (tensión) supere ese valor; pasarán: 21 pulsos. Si al discriminador se le aplican 2 unidades de tensión, sólo pasarán aquellos impulsos cuya tensión supere ese valor: se registrarán 18 impulsos. Si el nivel de discriminación se establece en 3 unidades solamente se registrarán 16 impulsos. Si el umbral se fija en 8 unidades solamente se tienen 2 impulsos que superan ese valor. Si al discriminador se le da una tensión de 10 unidades, solamente un impulso superará ese valor y solamente él podrá ser registrado. Si el nivel se lleva por encima de 11 unidades todos los impulsos serán rechazados y no se registrarán impulsos. (Fig. 12).

Cuando el equipo actúa con dos discriminadores se dice que funciona como espectrómetro.

Uno de los discriminadores selecciona la base y fija el nivel inferior del impulso. Los niveles de energía cuyos valores no superen los de base serán rechazados. El segundo equipo llamado superior, tiene la finalidad de discernir por la altura máxima del impulso, rechazando aquellos que superen la tensión no discriminada.

A la tensión asignada al discriminador inferior se le suele llamar base del discriminador (V), y a la diferencia entre la tensión del discriminador superior e inferior se la conoce por ventana o canal (ΔV).

La ventana puede variarse tomando valores diferentes.

Resumiendo: sólo serán aceptados impulsos cuyas alturas estén comprendidas en V y $V + \Delta V$.

Cuando el equipo funciona como espectrómetro se pueden también elegir variantes. La más común es la utilizada en el caso anterior: mantener la tensión aplicada al fotomultiplicador y el control de ganancia constantes, manteniendo también la ventana invariable, e ir modificando la tensión de base del discriminador.

Volviendo a la Figura 11 si la base del discriminador se fija en 0 y la ventana en 1 unidad, sólo serán registrados 4 impulsos. Si la base se fija en 1 y la ventana se mantiene constante sólo 3 impulsos responderán a las condiciones requeridas y serán contados. Si la base se fija en 2 con la misma ventana sólo se contarán 2 impulsos. Si la base se fija en 3 manteniendo la ventana sólo se registrará un impulso. El resultado de representar los impulsos registrados en función de la tensión aplicada al discriminador inferior (base del discriminador) manteniendo la ventana constante en una unidad

se puede apreciar en el Gráfico 13.

Si se representan las mismas variables pero utilizando una ventana constante de dos unidades de tensión ($\Delta V = 2$) se obtiene el gráfico de la Figura 13.

Las ventanas que se pueden utilizar son generalmente del 1 %, 2 %, 5 % y 10 % del rango total de la escala.

De acuerdo al gráfico de la Figura 14 podemos observar que la banda de energía va de 0,2 hasta aproximadamente 2,8 Mev.

De acuerdo a la posición de abertura de ventana vemos que si colocamos en T_3 sólo dejaría pasar Torio, si pasamos a la posición T_2 veremos Uranio y Torio y por diferencia obtenemos Uranio solo y si colocamos la perilla en la posición T_1 la ventana dejará pasar $U + Th + K$ y por diferencia sacamos K y si colocamos en la posición T_a obtenemos toda la gama del espectro de energía.

9. DESCRIPCION DE APARATOS DETECTORES

De acuerdo a que se quiera detectar y medir, habrá que contar con el apropiado instrumental, el que por supuesto deberá estar ajustado y calibrado observando las normas que para cada caso se fijen.

Pasaremos a describir someramente, dentro de los equipos que cuenta esta CNEA para la detección de partículas α ; β y de radiaciones γ .

Para el caso α : Cámara de Ionización
 Detector de Barrera
 Emanometría
 Centelleo

9.1.1. Cámara de ionización

Al hablar de la partícula alfa, se mencionó su alto poder ionizante, propiedad ésta que facilita su detección mediante el empleo de cámaras que encierran la varilla dispersora de un electrómetro del que está convenientemente aislada. Una fuente de alta tensión (200 V) de corriente continua alimenta al electrómetro.

Tal corriente eléctrica, polarizada positivamente, lleva al gas que se encuentra dentro de la cámara a un punto próximo al necesario para su ionización, de manera tal que al incorporar la fuente generadora de partículas alfa, éstas al sumar su carga, también positiva, provocan, ahora sí, la ionización del gas, generando una corriente eléctrica medible.

Esta corriente será tanto más intensa cuanto mayor sea la cantidad de partículas alfa presentes, que suman además su capacidad ionizante ($\pm 2 \times 10^5$ iones por partícula) favoreciendo el proceso.

En las tareas de prospección uranífera, este tipo de detector es utilizado en la exploración emanométrica, de la que se ocupará otro exposi-

tor, determinando en muestras de aire del suelo la presencia de Radón, isótopo del U^{238} y de Torón, isótopo del Th^{232} , que en su decaimiento emiten partículas alfa.

Los aparatos en uso presentan varias características interesantes:

- a) Electrómetro de gran sensibilidad.
- b) Ajuste de cero por variación del Background de la cámara.
- c) Selector de rangos.
- d) Indicador de tiempo de lectura (2 minutos).
- e) Posibilidad de discriminar origen de la partícula alfa (Rn^{220} o Tn^{220}).
- f) Expresar la concentración alfa en c/s o en emanés.
- g) Algunos modelos permiten reconocer el % de la medición originada solamente en el Radón.

9.1.2. Detectores de barrera

Estos equipos de aparición relativamente reciente en el mercado mundial, tienen como dispositivo electrónico una "juntura" constituida por un cristal de silicio y una lámina metálica de espesor micrométrico adosada a él polarizada inversa y componiendo un fuerte campo eléctrico.

Cuando una partícula alfa pierde su energía en esta zona, genera electrones que son recolectados rápidamente por el campo eléctrico existente. La carga adicionada es proporcional a la energía dejada por la partícula alfa.

En estos aparatos se anotan características muy interesantes, especialmente su eficiencia en la conversión de radiación a electricidad (requieren 3 eV para crear un electrón); alta densidad de materias para interactuar con la radiación; baja tensión de operación (aproximadamente 10 volt); bajo ruido de fondo.

9.2. PARA DETECCION GAMMA

Si bien la gama de aparatos detectores de radiación gamma es muy amplia, todos se basan en uno de los dos métodos ya enunciados, es decir que el elemento sensible sea un tubo Geiger Miller o en (o varios) cristales de ioduro de sodio activado por talio.

La concepción de los aparatos es lo que varía si bien lo hace de acuerdo a la aplicación y finalidad que se le dé, de modo que en lo que sigue trataremos de pasar revista rápidamente a los que creemos son de uso corriente.

9.2.1. Generalidades de un detector-integrador

Un equipo detector integrador es el conjunto capaz de acusar la presencia de radiaciones cualquiera sea el rango de energía de las mismas. De ahí que su uso esté limitado a una etapa primera de la prospección cuando no es necesario una gran exactitud de las mediciones, ni conocer cual es su tipo y origen. El circuito electrónico típico esquematizado en bloques se

ilustra en la Fig. 15.

La unidad detectora o cabezal está compuesta por un cristal de Ina(Tl) cuyas medidas geométricas varían de acuerdo al trabajo a que será destinado dependiendo del volumen su sensibilidad los que van en relación directa.

Adosado al cristal va el tubo fotomultiplicador cuyo contacto se realiza por medio de una grasa siliconada evitando posibles pérdidas de destellos. Este conjunto presenta la alternativa de venir integrado (unido) en una sola pieza o separado. La tensión de alimentación varía entre 900 y 1.200 voltios de corriente continua.

La forma que tiene el pulso a la salida del conjunto fototubo-cristal es el indicado en la Fig. 16 con una amplitud variable entre 0 y 2 volts según la tensión aplicada al fototubo y valor de la resistencia de carga del; mismos.

Una variante del sistema es reemplazar la unidad detectora descrita por un detector tipo Geiger Müller sin alterar el conjunto del diagrama en bloques.

PREAMPLIFICADOR

Su uso es principalmente el de adaptación de impedancia con un ganancia en tensión que se puede variar hasta 10 a 1.

El artificio se usa en los casos que se quiera una conexión superior a 10 metros aproximadamente entre detector e integrador.

En el caso de ser menor la distancia esta etapa se elimina. La señal en esta etapa tiene la forma que se indica en la Fig. 17.

Como se observará la señal de salida es la señal de entrada invertida. El pulso a la entrada del amplificador deberá ser siempre positiva.

INTEGRADOR

Se trata de un amplificador de banda ancha con un factor de amplificación de aproximadamente 5 veces en nuestro caso.

La forma de onda correspondiente es la indicada en la Fig. 18.

La onda de salida está defasada con respecto a la de entrada. La tensión de alimentación de la etapa puede variar entre 6 y 12 volts según sea la fuente de alimentación.

FLIP-FLOP

Se trata de un circuito biestable común formado generalmente por dos transistores. La tensión de alimentación es la misma que la de las etapas anteriores. (Fig. 19).

La frecuencia de la señal de salida es la mitad frecuencia de la en

trada y su forma de onda es una señal cuadrada con un máximo igual a la tensión de la fuente.

ADAPTADOR DE IMPEDANCIAS

Se utiliza tan sólo como su nombre lo indica adaptar impedancias de 2 etapas consecutivas, en este caso los del biestable y la etapa siguiente.

CONTAJE DE PULSOS (INTEGRADORA)

En esta etapa se integran los pulsos que hemos obtenido a la salida del biestable transformándolo en una corriente continua que luego se encargará de medir el instrumento.

En este se pueden utilizar varios métodos como el de hacer pasar la señal a través de capacitores en serie con la misma y mandándolo luego a una bomba de diodos o también integrarla con un circuito integrador (un amplificador operacional con un lazo de realimentación capacitivo). Las constantes de tiempo se logran mediante la colocación de grandes capacidades en paralelo con la señal. La señal de entrada es la misma que nos proporciona la salida del biestable.

9.2.2. Equipos de perfilaje gamma

La detección y medición de radiaciones gamma en las perforaciones se efectúa mediante dispositivos dimensionadas a tal fin. La porción detectora (detector más amplificador) se alojan en una vaina metálica de cierre hermético que queda unida a la unidad integradora mediante un cable de cuatro conductores con alma de acero y aislación de E.P.R. (etil propilene goma) de longitud variable según las necesidades y modelos.

El diámetro de la sonda varía en función del elemento detector entre 25 mms para la provista del tubo G.M. y 37 milímetros para la que cuenta con cristal de centelleo. Si bien para este último caso las dimensiones pueden variar en base a la geometría del detector que, como ya se dijo, es el factor que inside en relación directa sobre la sensibilidad del aparato.

El cable va arrollado en carrete accionado a mano e interconectado a la unidad integradora y provisto de un cuenta metros de modo de permitir al operador conocer la profundidad a que debe atribuirse cada registro, el que puede tomarse en el distanciamiento que se desee. El diámetro del cable debe fijarse a su largo y peso para que resista sin deformación y sin rotura debida a la tracción a que es sometido durante el ascenso de la sonda.

La unidad integradora a su vez está conectada a la fuente de alimentación que para estos equipos puede consistir en una batería de 12 volts o en pilas comunes hasta alcanzar ese valor. (El consumo es menor de 120 mA), contando con un verificador de la tensión de alimentación y con perillas selectoras de rangos.

Este conjunto presenta la ventaja de ser liviano y poco voluminoso permitiendo ser operable aún en condiciones topográficas desfavorables, pero el hecho de no brindar un registro continuo sino saltuario hace que frecuen-

temente se lo complemente con otros equipos que contiene un motor que acciona el carrete a velocidad constante y seleccionable y con un registrador gráfico de forma tal que se pueda obtener el perfilaje continuo de pozo.

Equipos más sofisticados pero más voluminosos permiten el perfilaje continuo del pozo y brindar, además del registro gamma una serie de parámetros físicos del subsuelo mediante el empleo de sondas combinadas que en general tienen mayor diámetro que las descritas anteriormente y mayor peso por incluir otros dispositivos, pero la sección detectora no se aparta en su conformación de lo que se detallara precedentemente.

9.2.3. Monitor portátil

El detector es un cristal de NaI(Tl) de 38 milímetros de diámetro por 25 milímetros de espesor acoplado directamente a un fototubo. Mediante grasa siliconada se logra un empalme total, evitándose el paso de la luz exterior por medio de un encintado plástico.

Los pulsos suministrados por el fototubo pasan a la unidad integrada donde son amplificados y enviados como corriente a un instrumento sensible de aguja.

Por su conformación física estos equipos son conocidos por el nombre de "pistolas detectoras"

Son los aparatos detectores más comunes en la prospección uranífera y han reemplazado en ese campo a los provistos con tubos G.M. Son equipos robustos, sólidos y livianos que cuentan con alarma sonora (gradualmente para cualquier valor de radiactividad a medir) además de la posibilidad de ser colimable y de estar alimentados por pilas comunes de linterna reemplazables fácilmente.

Mediante un selector de escalas se pueden leer en su instrumento analógico valores que van desde cero hasta 15.000 cuentas por segundo.

Como en los casos anteriores hay equipos como éstos provistos de unidad discriminadora que permiten efectuar lecturas sucesivas por conteo total, por uranio (Bi^{214}), torio (Tl^{208}) y potasio (K^{40}) sin que sus dimensiones varíen sustancialmente.

9.2.4. Túnel radimétrico para vagonetas

Este equipo se utiliza para medir el valor radimétrico del mineral transportado en una vagoneta desde los frentes de extracción. Consiste en dos cabezales detectores provistos cada uno de un cristal de NaI(Tl) de 25 mm de diámetro por 25 milímetros de espesor y de correspondiente tubo fotomultiplicador coliminado con plomo para evitar la captación de radiaciones provenientes de otro lugar.

Los elementos detectores así protegidos son montados en bastidores de manera de que cada uno de ellos se enfrenten a los laterales de la vagoneta.

Los pulsos generados por ambos detectores se suman y accionan un

integrador electrónico que tiene como elemento indicador a un instrumento de aguja, expresando la radiactividad en cuentas por segundo. Un selector de escalas permite medir entre 0 y 1.500 cuentas por segundo.

Una variante de este equipo lo constituye una especie de espada constituida por una vaina de acero inoxidable que aloja a un tubo G.M. interconectado a un integrador. La lectura se efectúa introduciendo la "espada" en no menos de tres lugares de la vagoneta cargada y promediando el registro obtenido en todas ellas. Su largo es de aproximadamente 800 milímetros y su diámetro de 25 milímetros.

9.2.5. Medición de frentes de explotación

Como no siempre resulta práctico manejarse en el interior de una mina con un instrumento de las dimensiones señaladas para la "espada", se reemplaza la cabeza detectora de ésta por una de aproximadamente 200 milímetros de largo que contiene un tubo G.M. interconectado por un cable a la unidad integradora. La nueva sonda está provista de un artificio de colimación que limita la parte sensible del tubo de manera de permitir mediciones puntuales desprovistas de influencias laterales. La parte integradora es del tipo convencional.

9.2.6. Túnel para camiones

El principio operativo y de medición es similar al descrito para vagonetas, sólo que los cabezales uno o dos (de acuerdo a la geometría de la caja del camión) están centrados con respecto a la superficie libre de la caja del camión y a una distancia aproximada de 5 metros de ella, distancia que se estima compensa la irregularidad de la carga.

9.2.7. Equipo para prospección aérea

Existen dos variantes dentro del equipamiento en uso en la prospección radimétrica desde aeronaves, tal como ocurre con los empleados en superficie, es decir aquél que brindará un registro único y global de las radiaciones que detecta y aquél que lo hará discriminado el origen de las mismas en base al rango de energía de cada una de ellas.

En el primer caso, el equipo está compuesto por un cristal de NaI(Tl) de aproximadamente 125 milímetros de diámetro y 75 milímetros de espesor adornado a un tubo fotomultiplicador constituyendo un conjunto incluido en un gabinete de aluminio que eléctricamente está conectado a la unidad de medición. Hasta aquí, salvo las dimensiones del cuerpo detector, es un aparato similar a los ya descritos, pero el hecho de tener que ir montado en una aeronave obliga a que el número de componentes periféricos aumente.

Los pulsos amplificados llegan a la unidad integradora donde simultáneamente se reflejan en un instrumento a aguja y en un registrador gráfico. El desplazamiento de este último se fija en base a la velocidad de vuelo del avión al igual que el disparador de una cámara fotográfica que va tomando exposiciones verticales de la superficie. El equipamiento se completa con un radialtímetro que envía una información constante de la altura de vuelo al registrador gráfico, simultánea con la unidad detectora, de tal forma que al analizar el registro se pueden hacer las correcciones por altura que correspondan.