

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 1	AÑO 1968

05.68.02

EN-4/10

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

GERENCIA DE ENERGIA

REGISTRO AUTOMATICO DEL ESPESOR DE NIEVE POR RADIOGRAFIA

Contrato de Investigación del OIEA No. 306/R1/RB

INFORME FINAL

Antonio C. Castagnet

Servicio de Aplicación Industrial - Departamento de Aplicación.

Buenos Aires - noviembre 1968

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

GERENCIA DE ENERGIA

REGISTRO AUTOMATICO DEL ESPESOR DE NIEVE POR RADIOGRAFIA

Contrato de Investigación del OIEA No. 306/R1/RB

INFORME FINAL

Antonio C. Castagnet

Servicio de Aplicación Industrial - Departamento de Aplicación

Buenos Aires - noviembre 1968

CONTENIDO

<u>SECCION</u>	<u>PAG.</u>
1.0.0 INTRODUCCION	3
2.0.0 DESCRIPCION DE LA INVESTIGACION REALIZADA	5
2.1.0 TEORIA SIMPLIFICADA DE MEDICION	5
2.2.0 DISEÑO DEL EQUIPO	10
2.3.0 DESCRIPCION DEL PROTOTIPO	15
2.4.0 ENSAYO EN CAMPAÑA	18
3.0.0 RESULTADOS Y CONCLUSIONES	18

NOTA: Ilustraciones y gráficos al final del texto.

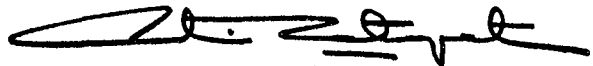
PROLOGO

Esta publicación es la versión española del informe final presentado en abril de 1967 al Organismo Internacional de Energía Atómica por el Servicio de Aplicación Industrial, -Departamento de Aplicación, Gerencia de Energía, de esta CNEA-, con relación al Contrato de Investigación No. 306/R1/RB de aquel Organismo, referente al proyecto titulado "Automatic Recording of Snow Cover Thickness by Radiography".

El trabajo descripto en el presente informe fue realizado con la colaboración técnica de la División Recursos Hídricos de la empresa del estado, Agua y Energía Eléctrica y la contribución financiera del OIEA.

Participaron en la ejecución del proyecto A.C. Castagnet (investigador científico principal), C.A. Cannistraci, J.F. Doedderer, A. Vignolo, M.C. Kopp y C.J. Lazor de la CNEA y los geólogos Sres. R.M. Vallejos y F.R. Madril de la empresa del estado Agua y Energía Eléctrica.

Noviembre, 1968



Antonio C. Castagnet
Jefe del Servicio de
Aplicación Industrial, CNEA

RESUMEN

En el presente informe se describe el desarrollo, construcción, instalación y ensayos, de un equipo para medir y registrar automáticamente el peso por unidad de superficie (densidad superficial) de las capas de nieve.

El método adoptado se basa en la atenuación de rayos gamma y en el uso de película radiográfica como detector-registrador. El principio de operación del nivómetro es el siguiente:

Una película radiográfica colocada a una altura fija de una fuente radiactiva se expone durante un tiempo preestablecido a un haz colimado de rayos gamma.

La densidad óptica resultante de la película revelada será función de la exposición total recibida, la cual, a su vez, dependerá de la intensidad de la radiación incidente.

La instalación se dispone en tal forma que la nieve pueda acumularse entre fuente y detector. La intensidad de radiación que llega a la película será función de la masa de nieve atravesada por los rayos gamma. Consecuentemente, se puede establecer una función de transferencia que vincule la densidad óptica de la película, con el espesor de agua equivalente a la densidad superficial del depósito de nieve.

Para evitar errores instrumentales y operacionales, las lecturas de densidad óptica se normalizan respecto a un valor de calibración, obtenido con una segunda fuente radiactiva de baja intensidad.

Esta última fuente se focaliza a una zona de la película adyacente a la de exposición y su intensidad no depende del proceso de acumulación de nieve.

Los registros periódicos se obtienen con una tira de película de 35 mm de ancho por 800 mm de largo, arrollada sobre un tambor y debidamente protegida de la radiación mediante un blindaje de plomo.

Un agujero vertical en el blindaje permite exponer solamente un área pequeña circular (4 mm de diámetro), bien definida, al haz de medición.

Cada 24 horas un sistema neumático y mecánico accionado por un reloj a cuerda, provoca una rotación fija del tambor. De esta manera se obtiene un registro radiográfico de la exposición, es decir, del peso/superficie promedio del depósito de nieve durante el período de registro.

La serie de imágenes diarias correspondientes a las exposiciones de medición y calibración (Fig. 6), se analizan luego con un densitómetro óptico y con la relación entre ambas lecturas se determina el espesor equivalente de agua mediante la función de transferencia. Se ensayaron varios tipos de películas y se obtuvieron curvas de calibración para diferentes condiciones de operación. En general conviene usar películas radiográficas de sensibilidad (velocidad) media o alta, preferiblemente con pantalla

intensificadora de plomo detrás del film.

En base a los resultados experimentales se diseñó y construyó un nivómetro para operar con 0,5 c de ^{60}Co . El rango útil de medida es hasta 1,70 m de nieve con error menor que $\pm 5\%$ si las lecturas de densidad óptica se hacen con precisión de 0,02 unidades.

Mayores espesores podrían cubrirse con 2 ó más unidades en serie vertical.

El equipo está proyectado para trabajar sin atención durante 4 meses, tomando su energía de un cilindro de gas comprimido.

El costo de fabricación del sistema completo es de aproximadamente U\$S 2.000.-

El nivómetro se probó en campaña 2 meses, en el paraje Las Leñas (Pcia. de Mendoza, 2.800 m sobre el nivel del mar), durante el invierno de 1966. Aunque no se registró nieve ese año en la zona, el ensayo demostró la confiabilidad del sistema pneumo-mecánico para funcionar automáticamente largo tiempo en condiciones climáticas severas, y la practicabilidad del método adoptado. Se espera, con los resultados de éste y de otros ensayos programados, mejorar el diseño del actual prototipo.

1.0.0 INTRODUCCION

La evaluación de la masa de nieve acumulada durante el invierno en las altas cuencas de los ríos de montaña, permite pronosticar los escurrimientos a largo plazo y mejorar, en base a dichos pronósticos, el manejo de los embalses y la racionalización de la energía eléctrica producida.

El alto costo de los trabajos de medición directa de la densidad superficial de nieve (es decir del peso de nieve por unidad de superficie) en zonas remotas, obliga ya sea a restringir el número de observaciones procurando registrar solamente la máxima acumulación de cada período, o a recurrir a la medición indirecta automática.

El primer procedimiento excluye la posibilidad de obtener valores indicativos del proceso de acumulación y fusión de nieve, lo cual se traduce en pronósticos más inciertos.

Los métodos indirectos podrían ser una buena solución del problema, siempre que los instrumentos de medición y registro fueran precisos y confiables bajo severas condiciones climáticas de operación, y que se pudieran construir a bajo costo.

El propósito del trabajo descrito en este informe, fue desarrollar y construir un equipo para la medición y registro automático de la densidad superficial de capas de nieve. El sistema adoptado se basa en la atenuación de rayos gamma, y en el uso de películas radiográficas como detector-registrador.

Las especificaciones del instrumento para el proyecto, fueron:

- 1) confiabilidad para operación continua automática a bajas temperaturas (menores que -20°C), durante largo tiempo (hasta 4 meses);
- 2) aplicabilidad a una amplia escala de espesores de nieve;
- 3) presentación de un registro cada 24 horas;
- 4) precisión en toda la escala de medida (error menor que $\pm 5\%$ del espesor real de nieve, en términos de altura de agua equivalente);
- 5) bajo costo;
- 6) fácil transporte e instalación.

El principio de operación del nivómetro es el siguiente:

Una película radiográfica colocada a una distancia vertical fija de una fuente radiactiva, se expone durante un tiempo preestablecido a un haz colimado de rayos gamma.

La densidad óptica resultante de la película revelada, será función de la exposición total recibida, la cual, a su vez, dependerá de la intensidad de la radiación incidente.

La instalación se dispone en tal forma, que la nieve pueda acumularse entre fuente y detector. La intensidad de radiación que llega a la película será función de la masa de nieve atravesada por los rayos gamma. Consecuentemente, se puede establecer una función de transferencia que vincule la densidad óptica de la película, con el espesor de agua equivalente a la densidad superficial del depósito de nieve.

Para evitar errores instrumentales y operacionales, las lecturas de densidad óptica se normalizan respecto a un valor de calibración, obtenido con una segunda fuente radiactiva de baja intensidad.

Esta última fuente se focaliza hacia una zona de la película adyacente a la de exposición, pero de tal forma que la intensidad de radiación recibida por el film, no depende del proceso de acumulación de nieve.

Los registros periódicos se obtienen con una tira de película de 35 mm de ancho por 800 mm de largo, arrollada sobre un tambor angosto y debidamente protegida de la radiación, mediante un blindaje de plomo.

Un agujero cilíndrico vertical a todo lo largo del blindaje, permite exponer solamente un área pequeña circular (4 mm de diámetro), bien definida, al haz de medición.

Cada 24 horas un sistema neumo-mecánico accionado por un reloj a cuerda, provoca una rotación fija del tambor. De esta manera se obtiene un registro radiográfico de la exposición, es decir del peso/superficie promedio del depósito de nieve, durante el período de registro.

Al finalizar el invierno se retiran las películas de las diferentes estaciones nivométricas y se revelan en un laboratorio central, de acuerdo a un procedimiento normalizado.

La serie de imágenes diarias correspondientes a las exposiciones de medición y calibración, se analizan luego con un densitómetro óptico, y, con la relación entre ambas lecturas, se determina el espesor equivalente de agua mediante la función de transferencia.

La primera parte del trabajo consistió en el análisis teórico del principio de operación del nivómetro, y en un estudio del comportamiento de películas radiográficas expuestas a bajas temperaturas y a largo tiempo de almacenaje.

Se halló una función de transferencia simplificada que da la respuesta del medidor a los parámetros del proceso, siendo la densidad superficial de nieve la variable independiente.

Se definieron las posibilidades y limitaciones del método propuesto y se elaboró y ejecutó un programa de experimentación.

En la segunda parte del trabajo se diseñó y construyó un prototipo del nivómetro, efectuándose un ensayo en campaña de todo el sistema, en las condiciones reales de operación.

El costo de fabricación de todo el sistema suma aproximadamente U\$S 2.000.-

Los planos de los conjuntos y partes del nivómetro no han sido incluidos en este informe, pero pueden consultarse a través del Servicio de Aplicación Industrial, CNEA, o del OIEA.

2.0.0 DESCRIPCION DE LA INVESTIGACION REALIZADA

2.1.0 TEORIA SIMPLIFICADA DE MEDICION

Se puede definir como exposición radiográfica al producto del flujo de fotones primarios perpendicular a la superficie del film, por el tiempo en que la película permanece sometida al campo de radiaciones.

Para el sistema ilustrado en la Fig. 1, denominando E a la exposición resulta:

$$E = \frac{n_0}{4 \pi d^2} \exp(-\mu r) \cdot t \quad \text{fotones/cm}^2 \quad (1)$$

donde:

n_0 , número total de fotones emitidos por la fuente en la unidad de tiempo (fotones/s)
 d , distancia fuente-placa (cm)
 r , densidad superficial de nieve (g/cm²)
 μ , coeficiente másico de atenuación total para la radiación del ⁶⁰Co en agua (cm²/g)
 t , tiempo de exposición (s)

Denominaremos "función de transferencia" a la relación matemática entre la respuesta del equipo, (densidad óptica de la película) y los parámetros del proceso de medición, donde el peso superficial de nieve interviene como variable independiente.

Esta función de transferencia no es más que la expresión analítica de la curva de calibración del nivómetro, y para poder deducirla, se requiere primero conocer la relación entre la densidad óptica del film y la exposición.

La densidad óptica del film es directamente proporcional al número de granos por cm² de emulsión, sensibilizados por la radiación.

Dentro de los alcances del presente estudio, es suficiente una derivación simpli-

ficada de la función de transferencia, para lo cual aceptaremos las siguientes suposiciones:

- a) una sola interacción de la radiación gamma en un grano basta para sensibilizarlo y hacerlo revelable;
- b) todos los granos ofrecen igual sección eficaz total a la radiación, y están uniformemente distribuidos en la superficie de la película;
- c) no hay interacción de la radiación dentro de la emulsión;
- d) la radiación incide normalmente a la película.

En estas condiciones la cantidad de interacciones (Δn_T) por segundo y por cm^2 de film será:

$$\Delta n_T : n N_0 a \quad \text{interacciones/cm}^2 \text{ s} \quad (2)$$

donde:

n , número de fotones incidentes por segundo y por cm^2 sobre el film (fotones/s. cm^2)
 N_0 , cantidad total de granos por cm^2 de película expuesta (granos/ cm^2)
 a , sección eficaz total por grano, para la radiación incidente (cm^2/grano)

Las interacciones expresadas por la ec. (2) ocurren tanto en granos ya sensibilizados como en aquellos que aún no lo están.

Al tiempo t existirá un remanente de N granos no sensibilizados por cm^2 de película, y la velocidad de interacción de la radiación con estos granos será:

$$\Delta n = n N a \quad \text{interacciones/cm}^2 \text{ s} \quad (3)$$

En consecuencia, aplicando la equivalencia de que una interacción implica la sensibilización de un grano, la velocidad de sensibilización será:

$$\frac{dN}{dt} = -n N a \quad \text{granos/cm}^2 \text{ s} \quad (4)$$

(El signo menos indica que se trata de una disminución de la variable N)

Integrando la ec. (4) de 0 a t , resulta:

$$N(t) = N_0 \exp (-nta) \quad \text{granos no sens. /cm}^2 \quad (5)$$

Reemplazando $nt = E$, ec. (1):

$$N(E) = N_0 \exp (-a E) \quad \text{granos no sens. /cm}^2$$

El número de granos $N'(E)$ sensibilizados por cm^2 al tiempo t , y por tanto revelables, será

$$N'(E) = N_0 [1 - \exp(-a E)] \quad \text{granos sens. /cm}^2 \quad (6)$$

$N'(E)$ es directamente proporcional a la densidad óptica $D(E)$ de la película

$$D(E) = k N_0 [1 - \exp(-a E)] \quad \text{unidades densidad óptica} \quad (7)$$

donde:

k , constante de proporcionalidad.

Para valores pequeños de E resulta

$$D(E) = k N_0 a E \quad \text{unidades de densidad óptica} \quad (8)$$

es decir la densidad óptica es función lineal de la exposición.

En las condiciones reales de operación del nivómetro, la respuesta final de la película en términos de densidad óptica, vendrá afectada por las siguientes variables:

Disipación ("fading") de la imagen latente: Este factor depende de la atmósfera, de la temperatura y del tiempo transcurrido desde la formación de la imagen latente.

La atmósfera influye a través de sus componentes y su humedad.

La humedad juega un papel muy importante. Albouy y Faraggi (1949) investigaron la variación de disipación de la imagen latente, en función de la humedad relativa de la atmósfera que rodea la emulsión.

Sus resultados aparecen en la Fig. 2, donde θ representa el tiempo necesario para reducir la densidad del grano a la mitad.

Al comparar esta curva con otra dada por Mees (1942), Fig. 3, en la que muestra la relación entre la humedad absorbida por la gelatina de la emulsión y la humedad relativa del aire, se deduce que la velocidad de disipación es una función exponencial del contenido de humedad retenido por la gelatina.

Estos mismos autores han examinado también, el efecto de variar la composición de la atmósfera que rodea a la emulsión, manteniendo constante la humedad relativa.

Así encontraron que la velocidad de disipación es dos veces mayor para oxígeno que para aire, y cerca de diez veces mayor para oxígeno que para nitrógeno.

La variación de la velocidad de disipación de la imagen latente con la temperatura, puede considerarse como efecto de aquella sobre la velocidad de la reacción quí-

mica sólido-gas, - que se presume ocurre durante la disipación, - entre ciertos constituyentes de la atmósfera y los centros de plata activados de la emulsión.

Esto conduce a una forma de relación de Arrhenius, para expresar la velocidad de desaparición de los centros activados:

$$- \frac{dN}{dt} = C \cdot \exp (k/T) \quad (9)$$

donde:

T , temperatura absoluta de almacenaje
k y C, constantes.

A igualdad de otras condiciones, la disipación de la imagen será una función exponencial de la inversa de la temperatura, como fué confirmado experimentalmente en 1949.

Para obtener una relación entre la regresión de la imagen latente y el tiempo transcurrido desde su formación, bajo condiciones ambientales fijas (atmósfera, humedad, temperatura), la velocidad de disipación puede considerarse proporcional al número de granos sensibilizados presentes en la película.

$$\frac{dN'}{dt} = -C \cdot N' (t) \quad \text{granos sensibilizados/cm}^2 \cdot s \quad (10)$$

Integrando entre t_0 y t :

$$N'_t = N'_{t_0} \exp \left[-C (t - t_0) \right] \quad \text{granos sens./cm}^2 \quad (11)$$

donde:

N'_{t_0} , granos sensibilizados por cm^2 al tiempo de exposición t_0 ;
 N'_t , granos sensibilizados por cm^2 remanentes al tiempo t de lectura (revelado);
C , constante que depende de las características de la película y condiciones en que se halla almacenada.

Consecuentemente, la densidad óptica habrá variado según la misma ley,

$$D_t = D_{t_0} \exp \left[-C (t - t_0) \right] \quad \text{unidad de densidad óptica} \quad (12)$$

Temperatura durante la exposición: Beiser (1951) halló una relación empírica que da la variación de la densidad del grano con la temperatura, para emulsiones nucleares expuestas a protones monoenergéticos. Sus conclusiones pueden aplicarse a radiación gamma y películas radiográficas.

$$N' = A \exp (-E_1/kT) \left[1 - a \exp (-E_2/kT) \right] \quad \text{granos sens./cm}^2 \quad (13)$$

donde:

N' , densidad del grano;
 T , temperatura absoluta de exposición;
 A , función de la sensibilidad de la emulsión y de la rapidez con que las partículas que producen la trayectoria pierden su energía;
 a y E , constantes que dependen de la emulsión.

La primera exponencial tiene en cuenta el efecto de la temperatura sobre el desplazamiento de los iones de plata hacia los núcleos sensitivos, durante la exposición.

La segunda exponencial nace de considerar al mismo tiempo la liberación de iones desde los núcleos, debida a la eyección termal de electrones.

Procesamiento de la película: Las condiciones de revelado influyen fuertemente en la densidad óptica resultante de la película. El rango útil de un film puede extenderse con reveladores de diferentes características.

La influencia de los tres efectos considerados: disipación de la imagen latente, temperatura de exposición y condiciones de revelado, pueden representarse por medio de tres factores independientes:

ϕ_a = factor de disipación de la imagen latente
 ϕ_t = factor de temperatura
 ϕ_r = factor de revelado.

Denominando D_0 a la densidad óptica que correspondería al film expuesto, almacenado y revelado en condiciones normales, la densidad D resultante de un apartamiento de dichas condiciones sería

$$D = D_0 \phi_a \phi_t \phi_r \quad (14)$$

Para eliminar la influencia de todos esos factores, -imposibles de conocer con exactitud en las condiciones reales de operación del nivómetro-, se debe concurrir a una normalización de las lecturas con respecto a un valor de referencia.

Dicho valor corresponderá por ec. (1) a la exposición de referencia

$$E_r = n_r t$$

de modo que la densidad óptica de comparación será, ec. (7):

$$D_r = k N_0 \left[1 - \exp (-a n_r t) \right] \phi_a \phi_t \phi_r \quad \text{unidad de densidad óptica}$$

y la lectura normalizada:

$$D_n = D/D_r = \frac{1 - \exp(-ant)}{1 - \exp(-an_r t)} \quad (15)$$

La función de transferencia normalizada será aquella que exprese el espesor de nieve (r en la Fig. 1) en función de D_n (densidad óptica normalizada).

De la ec. (15):

$$n = -\frac{1}{at} \cdot \ln \left\{ 1 - D_n \left[1 - \exp(-an_r t) \right] \right\} \quad \text{fotones/cm}^2 \cdot s$$

De la ec. (1)

$$n = \frac{n_0}{4 \pi d^2} \exp(-\mu r)$$

$$\exp(-\mu r) = -\frac{4 \pi d^2}{a n_0 t} \ln \left\{ 1 - D_n \left[1 - \exp(-an_r t) \right] \right\}$$

Denominando:

$$C_1 = \frac{4 \pi d^2}{a \cdot n_0}$$

$$C_2 = a n_r$$

Finalmente se obtiene:

$$r = -\frac{1}{\mu} \cdot \ln \left| -\frac{C_1}{t} \ln \left\{ 1 - D_n \left[1 - \exp(-C_2 t) \right] \right\} \right| \quad (16)$$

Deliberadamente se ha expresado el tiempo t de exposición, pues es un factor que no puede eliminarse con la normalización.

El equipo debe diseñarse y construirse para garantizar la máxima constancia de dicho parámetro.

2.2.0 DISEÑO DEL EQUIPO

El análisis de la teoría simplificada de medición ha puesto de relieve los factores que afectan la respuesta de la película, y ha demostrado al mismo tiempo, la necesidad de normalizar las lecturas respecto a una densidad óptica de referencia.

Las conclusiones del análisis anterior, sumadas al conocimiento de las características de las películas disponibles comercialmente y a las condiciones operativas del nivómetro, permitieron establecer los parámetros fundamentales de diseño, y orientar el desarrollo de los experimentos previos a la construcción del prototipo.

2.2.1 Distancia fuente-placa

Dado el tiempo de exposición (24 horas) y siendo la fuente radiactiva ^{60}Co , la distancia fuente-placa resulta de un compromiso entre la actividad de la fuente y el rango útil (en mr) de la película.

En la disposición de la Fig. 1 la exposición de la placa en mr al cabo de 24 horas será

$$E = AE_0 \left(\frac{100}{d} \right)^2 \cdot \exp(-\mu r) \quad \text{mr} \quad (17)$$

donde:

E_0 , exposición producida en 24 horas por un curie de ^{60}Co a 1 m, en aire (mr);

d , distancia fuente-placa (cm);

A , actividad de la fuente (curie);

μ , coeficiente másico de atenuación total para ^{60}Co en agua ($0,0615 \text{ cm}^2/\text{g}$);

r , densidad superficial de la capa de nieve (g/cm^2).

De la ec. (17) se obtienen las siguientes relaciones:

$$E_{\text{máx}} = AE_0 \left(\frac{100}{d} \right)^2 \quad \text{mr} \quad (18)$$

$$E_{\text{min}} = AE_0 \left(\frac{100}{d} \right)^2 \exp(-\mu r_0) \quad \text{mr} \quad (19)$$

$$\frac{E_{\text{máx}}}{E_{\text{min}}} = \exp(\mu r_0) \quad (20)$$

y de la Fig. 1:

$$r_0/\rho \leq d - (S_1 + S_2) \quad \text{cm} \quad (21)$$

donde:

ρ , densidad de la nieve (aprox. $0.3 \text{ g}/\text{cm}^3$);

r_0 , máxima altura de nieve (en g/cm^2);

S_1, S_2 , longitudes del blindaje de la película y de la fuente (cm)

(el signo $\leq$ en ec. 21 ha sido introducido para evitar la perturbación de la unidad detectora del nivómetro en la deposición natural de la nieve)

El rango útil de la película en mr debe cumplir con la relación (20) y simultáneamente con las condiciones impuestas por (18) y (19).

La actividad de la fuente y la distancia d , determinan el valor de S_1 para que la dosis total de la película no expuesta, no supere 5 mr al cabo de 4 meses de colocada

en el nivómetro.

El tipo óptimo de película será aquel que con la menor actividad A, permita ubicar la fuente a la mayor distancia d (películas rápidas).

Para efectuar esta evaluación se obtuvo información técnica y envío de muestras de las siguientes firmas:

- E.I. Dupont de Nemours and Company Inc.
- Ferrania
- Ilford Limited
- Gevaert - Agfa N.V.
- General Aniline and Film Corp.
- Eastman Kodak Company

El comportamiento de una película en particular, para una dada distancia fuente-placa, puede predecirse aproximadamente en la siguiente forma:

Supongamos que por consideraciones de seguridad radiológica, peso de blindaje y costo, decidimos utilizar como fuente 500 mc de ^{60}Co ; con este dato es posible obtener una serie de curvas de la exposición E, ec. (17), para diferentes valores de d.

Estas curvas se han representado en la Fig. 4 como $\log E$ en función del espesor de agua equivalente a la masa de nieve depositada.

La densidad óptica que puede esperarse de una dada película en función de r y d se obtiene combinando la información de la Fig. 4 con la curva característica del film (densidad neta en función de la exposición) que es suministrada generalmente por el fabricante.

Las Figs. 5, 6 y 7 representan las curvas características de las películas Dupont tipo 555, Ilford Industrial A y Ansco Superay D. Las Figs. 8, 9 y 10 son las respectivas curvas de calibración obtenidas mediante el procedimiento anterior.

En general, el efecto de las pantallas intensificadoras de plomo sobre las curvas de calibración, deberá determinarse mediante experimentos para cada caso particular.

La pendiente de las curvas de calibración permite evaluar gráficamente el error del método de medida en cualquier espesor de la escala.

Limitando este error al $\pm 5\%$ y teniendo en cuenta una apreciación mínima de 0.02 unidades de densidad óptica, se ve que para una densidad de nieve de $0,3 \text{ g/cm}^3$ la distancia óptima fuente-placa cae alrededor de los 2,50 m, si se usan películas rápidas con pantalla reforzadora.

La escala útil de medida para la nieve será aproximadamente 2 m (equivalente a 60 cm de agua).

Para mayores espesores se pueden utilizar dos o más equipos en serie vertical ó dos unidades de detección, una inferior y la otra superior, irradiadas con la misma fuente colocada en el medio. Con este último procedimiento se duplicaría prácticamente la escala de medición.

Los datos finalmente adoptados para la construcción del prototipo fueron.

$$\begin{aligned}d &= 220 \text{ cm} \\S_1 &= 20 \text{ cm} \\S_2 &= 10 \text{ cm} \\r_o/\rho &= 170 \text{ cm}\end{aligned}$$

En la práctica habrá unos 20 cm de distancia entre la máxima altura de nieve medida por el equipo y la cara inferior de la unidad de detección.

2.2.2 Ensayos de laboratorio

En un primer intento para estudiar la influencia de las bajas temperaturas de exposición sobre las curvas características de las películas, y su efecto en la calibración del nivómetro, se diseñó y construyó un sistema para la irradiación simultánea de varias muestras de films, a bajas temperaturas.

El sistema consistió en un irradiador y una cámara térmica.

La base del irradiador fue una placa de aluminio de 12 mm de espesor con 7 ranuras circulares concéntricas de 4 mm de ancho, 4mm de profundidad y diámetros dimensionados para obtener exposiciones de 2, 3, 4, 5, 6, 8 y 10 roentgens con una fuente de 9,36 mc de ^{60}Co y 5 hs 34 min de exposición.

La fuente radiactiva se ubicó en el centro de la placa de aluminio y las muestras de película (3,1 cm x 4,1 cm) se distribuyeron radialmente, soportadas en las ranuras por medio de resortes formando anillos.

Para el ensayo a baja temperatura, el conjunto se introdujo en una cámara cerrada construida con un material aislante térmico (Telgopor), de tal forma que la placa apoyaba sobre un lecho de hielo seco.

Se hicieron dos ensayos con el mismo tipo de película; uno a temperatura ambiente y otro a baja temperatura.

El tiempo de irradiación fue en ambos casos de 5hs 34 min.

En el segundo ensayo la temperatura se controló con un termómetro de alcohol en 3 puntos: en contacto con la placa de aluminio (-45 C); a la altura del centro de las películas (-18 C) y en la parte superior de la cámara (-12 C).

En consecuencia la temperatura de la película puede suponerse por lo menos de -20 C.

En la Fig. 9 han sido reproducidos gráficamente los datos experimentales obtenidos para una placa dental Dupont tipo D.

A -20 C puede observarse una disminución de sensibilidad con respecto a la temperatura ambiente, del orden del 15%. Este dato concuerda con lo anticipado por la mayoría de las firmas comerciales consultadas.

Para reproducir las condiciones de exposición de la película en el nivómetro, se construyó el dispositivo experimental mostrado en las Figs. 12 y 13.

Este dispositivo, junto con una fuente de ^{60}Co y un recipiente con agua, se usó para determinar la respuesta de la película seleccionada, en función de espesores de agua variables, y calcular también la actividad de la fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, para producir la exposición de referencia.

La película se coloca entre Pos 1 y Pos 2. La Pos 3 es una placa de plomo que actúa como pantalla intensificadora. La Pos 4 es un colimador de plomo de 20 cm de largo, con un orificio de $\varnothing$ 4 mm para permitir el pasaje del haz de medición. La Pos 5 es un irradiador que contiene 8 fuentes de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ de diferentes actividades, preparadas con yeso, de acuerdo al método descrito por R.A. Dudley. La actividad específica de una fuente a otra difiere por un factor 1,39, siendo la máxima actividad específica 150 $\mu\text{C/g}$.

Con una sola exposición se tienen 8 imágenes periféricas con una adecuada relación de densidad óptica para el trazado de la curva característica.

Como simultáneamente se obtendrá una imagen central, correspondiente al espesor de agua, se puede deducir de la curva característica anterior, la actividad adecuada de la fuente de referencia.

Entre el irradiador (Pos 5) y el colimador superior (Pos 6), se pueden intercalar filtros de aluminio para que en 24 horas el rango de exposición de las fuentes de ^{90}Sr coincida con el rango útil de la película.

La actividad adoptada para la fuente de referencia en el prototipo fue de 20 μC ^{90}Sr .

Para el procesado de las películas se siguieron las normas de los respectivos fabricantes.

Las lecturas de densidad óptica se hicieron con un densitómetro marca Baldwin, con escalas de 0 a 3, 1 a 4 y 2 a 5 unidades de densidad óptica.

2.3.0 DESCRIPCION DEL PROTOTIPO

El nivómetro construido en la CNEA, se compone de las siguientes partes:

2.3.1 Unidad de detección (Fig. 14)

La idea original de arrollar la película radiográfica sobre dos carretes, - en forma similar a lo que se hace en las cámaras fotográficas -, fue abandonada por la posibilidad de que, debido a las bajas temperaturas, la película se tornara quebradiza, causando dificultades durante su avance. Este riesgo fue señalado por la mayoría de los fabricantes de película, mencionados en la Sección 2.2.1.

En consecuencia, se decidió arrollar la película, - una tira de 35 mm de ancho por 800 mm de largo -, sobre una especie de llanta ó tambor de aluminio (Pos 1). La llanta tiene una tapa también de aluminio (Pos 2) que provee un cierre hermético de la película mediante un aro de neoprene (Pos 3) y tornillos (Pos 4).

El conjunto de la llanta con su tapa forma un portafilm independiente de fácil colocación y reemplazo. Para extraer el portafilm, una vez abierta la puerta de la unidad de detección (Pos 5), se gira una vuelta el tornillo indicado en (Pos 6), y se tira hacia afuera el conjunto.

La tapa tiene un agujero en el centro, que va acoplado a un eje motriz (Pos 7) mediante un perno de arrastre. Entre la llanta y el eje hay un blindaje anular de plomo (Pos 8), para proteger la película tanto de la radiación directa como de la radiación dispersa.

El blindaje anular de plomo está fijado a un bastidor (Pos 9) solidario a la carcasa de la unidad de detección (Pos 10), y no interfiere con el movimiento del portafilm.

En la superficie cilíndrica de la llanta, donde apoya la película, se ha colocado una cinta de plomo de 0,127 mm de espesor, para que actúe como pantalla intensificadora de la imagen de medición.

Un colimador de plomo de 20 cm de largo (Pos 11), fijo a la base de la carcasa por un extremo y a la plataforma de la estructura de montaje por el otro, limita la radiación incidente sobre la placa a un haz cilíndrico de 4 mm de diámetro.

La exposición de referencia para la normalización, se logra con una fuente colimada de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (Pos 12), preparada según se indicó en la Sección 2.2.2.

El movimiento del porta-película se obtiene con el eje motriz, mediante una corona dentada (Pos 13) y un trinquete, éste último accionado por un impulsor neumático (Pos 14).

Por cada accionamiento del trinquete (una vez cada 24 horas) avanza un diente

de la corona, y la llanta con la película gira 3 grados, que corresponde a un arco de 6 mm.

Este pequeño desplazamiento permite acumular 120 exposiciones de $\varnothing$ 4 mm, en una longitud de película de 780 mm.

Las Figs. 15 a, b y c ilustran tipo de imágenes correspondientes a exposiciones de medición y referencia, obtenidas bajo diferentes condiciones.

La operación periódica del impulsor neumático a intervalos fijos de 24 horas, se logra mediante la unidad de programación descrita en la Sección 2.3.3.2.

La palanca indicada en la Pos 15 permite operar el impulsor en forma manual, para la calibración del equipo.

El conjunto de la unidad de detección está protegido externamente, con una cubierta de aluminio (Pos 16) forrada con aislante térmico.

2.3.2 Unidad de irradiación (Fig. 16)

La unidad de irradiación consiste en un blindaje esférico de plomo de $\varnothing$ 20 cm, protegido por una carcasa de acero, en cuyo interior, en un portafuentes de bronce, se aloja la fuente sellada de 500 mc de ^{60}Co .

Un agujero en el blindaje limita la salida de radiación a un cono de ángulo pequeño, focalizado hacia la unidad de detección. En depósito o durante el transporte, la fuente permanece bloqueada por un tapón cilíndrico. La fuente radiactiva es de 2 x 2 mm y fue comprada al CEA (Francia). La dosis por unidad de tiempo a 1 metro de la fuente, medida a través del blindaje, es de 2,5 mr/h. La unidad pesa 55 kg.

2.3.3 Sistema de localización del film (Fig. 17)

La localización automática del porta-película durante el período de medición, se obtuvo a través de un sistema neumático compuesto de las siguientes partes:

- 1) fuente de energía
- 2) unidad de programación
- 3) impulsor neumático.

2.3.3.1 Fuente de energía: la potencia requerida por el sistema fue provista por un cilindro de argón comprimido, de 40 litros de capacidad a 150 atmósferas (equivalente a 6 m³ de gas a PTN). La presión del gas en la línea de consumo se mantiene constante a 3,5 atmósferas, por medio de una válvula de regulación automática.

2.3.3.2 Unidad de programación (Fig. 18): la salida de argón a intervalos fijos, está controlada por un relay neumático, operado por un reloj en la siguiente forma:

Cada 24 h, una leva (Pos 3) ubicada en el dial móvil del reloj, levanta la palanca (Pos 1) del relay, permitiendo así el pasaje de gas al sistema.

El gas a presión se usa tanto para mover un motor neumático que recarga la cuerda del reloj, como para accionar el impulsor neumático de la unidad de detección. Cuando la operación de ambos dispositivos ha sido completada, la presión en la línea aumenta nuevamente, forzando al gas a recircular por el relay.

Durante esta segunda etapa, la presión del gas se usa para restablecer el relay a sus condiciones iniciales, dejando de ese modo preparado el sistema, para el ciclo siguiente. El tiempo total insumido por esas operaciones es menor que un segundo.

La regularidad de los ciclos está garantizada por un reloj del tipo de contacto (marca Landis and Gyr-Zug, suizo), especialmente adaptado para alojar y operar el relay neumático. Como el reloj tiene cuerda sólo para 35 días, y se supone que el sistema debe trabajar 4 meses sin atención, es necesario incorporar un motor neumático para recargar la cuerda (no incluido en el actual prototipo).

2.3.3.3 Impulsor neumático: este dispositivo consiste en un pequeño block de dos cilindros en línea: uno con un pistón neumático y el otro con un resorte de regulación.

Al entrar el gas en el impulsor, el vástago del pistón presiona hacia abajo un extremo de un trinquete oscilante, haciendo que la corona avance un diente.

Durante esta etapa, el resorte, que va colocado sobre el extremo opuesto del trinquete, queda comprimido. Cuando el relay neumático cierra la entrada de gas, la presión sobre el pistón desaparece gradualmente, permitiendo que el resorte empuje hacia abajo el correspondiente extremo del trinquete, hasta trabar la corona dentada.

Con el procedimiento descrito se logra el doble propósito de mover y localizar el portafilín, de acuerdo al programa de exposiciones previsto.

2.3.4 Estructura de montaje (Fig. 19)

Consiste en una torre de 3 m de alto, construída con caños soldados, de sección triangular (23 cm por lado), similar a las usadas como antenas de radio, con un bastidor en el tope para sostener la unidad de detección.

La instalación se hace enclavando directamente la torre en el suelo. La rigidez geométrica se consigue por medio de tensores.

La unidad de irradiación se monta sobre el terreno, de tal manera que la fuente de ^{60}Co y el colimador de la unidad de detección, quedan verticalmente alineados.

2.4.0 ENSAYO EN CAMPAÑA

El nivómetro se instaló en los alrededores de la estación "Las Leñas" (Pcia. de Mendoza, 2.800 m sobre el nivel del mar). Durante la primera semana de mayo de 1966 se montaron la estructura y la unidad de irradiación. Las Figs. 20 y 21 ilustran esta fase de los trabajos.

Un mes más tarde fueron instaladas la unidad de detección y el sistema neumático.

La unidad de detección se colocó a 2,50 m de la fuente y se cargó con película Kodak AA. Detrás se usó una pantalla intensificadora de plomo de 0,1 mm de espesor, cubriendo solamente la mitad del ancho del film (lado de la exposición de medida). Para obtener la exposición de referencia, se empleó una fuente de 20 μ c de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

El sistema completo se dejó sobre el terreno, en operación automática, durante 53 días. De acuerdo con datos de años anteriores, se esperaba tener en el lugar, una capa de nieve de 1,20 a 1,50 m de espesor.

3.0.0 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El sistema neumático funcionó sin fallas actuado automáticamente por el reloj. Se obtuvieron así 53 imágenes dobles correspondientes a las exposiciones de medición y referencia.

Lamentablemente los propósitos del ensayo fueron logrados sólo en forma parcial por la falta de acumulación de nieve en el lugar donde estaba instalado el nivómetro, debido a los vientos excepcionalmente intensos registrados durante esa temporada en la zona.

Por otra parte, el efecto de la radiación de fondo (background) en la película, particularmente en la mitad con pantalla intensificadora, resultó mayor que el esperado, enmascarando en parte la densidad óptica de las imágenes obtenidas.

Sin embargo el ensayo permitió derivar las siguientes conclusiones:

1) El uso de pantallas reforzadoras y películas rápidas, si bien amplía la escala de medición, requiere un blindaje más eficiente tanto contra la radiación de la fuente, como contra la radiación de fondo. Esto puede lograrse con el uso de aleación de tungsteno en el lugar de plomo.

Un diseño más compacto de la unidad de detección facilitaría su blindaje sin acarrear aumento excesivo de peso.

En este sentido tal vez convendría volver sobre la idea original de arrollar la

película en dos carretes, teniendo en cuenta la posibilidad de efectuar el desplazamiento del film durante el día, en la hora de mayor temperatura ambiente. En las zonas donde se ha pensado intalar los nivómetros, la temperatura máxima nunca es menor que unos pocos grados bajo cero y, en estas condiciones, el desarrollamiento de la película es perfectamente practicable.

2) El contacto prolongado del film con las pantallas intensificadoras de plomo, podría causar, por acción química, una exposición aparente de la emulsión. Este punto requiere mayor investigación.

Además, el plomo utilizado en la confección de las pantallas, debe estar libre del isótopo radiactivo Ra D (vida media 22 años) naturalmente presente en el metal.

3) La radiación beta de la fuente de referencia, aunque esté bien colimada en su origen, se dispersa al atravesar la pared de aluminio del recipiente donde se encuentra alojada la película, y produce en definitiva una imagen difusa, en contraste con el círculo bien definido de la exposición de medida (ver Fig. 15).

Habría que investigar la posibilidad de usar algún emisor gamma débil, por ej. ^{241}Am , en lugar de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, para mejorar la calidad de la imagen de referencia, sin riesgos de aumentar la exposición de fondo en el resto de la película.

Como era de esperar, este primer prototipo es susceptible de perfeccionamiento y, en este sentido, la CNEA en colaboración con Agua y Energía Eléctrica, habrá de continuar los ensayos, existiendo planes para la instalación definitiva de dos equipos en el futuro próximo.

BIBLIOGRAFIA

Doremus, J.A., *Electronics* 24 (1951) 88-92.

Fischmeister, V., *Atompraxis* 2 (1956) 113-5.

Gerdel, R.W., Hansen, B.L., and Cassidy, W.C., *Trans. Amer. Geophys. Union* 31 (1950) 449-53.

Itagaki, K., *J. Geophys. Res.* 64 (1959) 375-83.

Drigo, A., Forlani, F., and Tagliati, S., "Measurement of the water equivalent of a snow cover by means of the absorption of a gamma ray beam", *Società Adriatica de Electricità*, Venice, (Oct. 1958) 16 pags.

Rapport national, France, WP/34/10, Enquete Internationale sur les Applications Des Radioisotopes dans l'Industrie, OIEA, (1963) 82.

Beisler, A., "Nuclear Emulsion Technique". *Rev. Mod. Phys.*, 24 (1952).

Hine, G.J., "The Range of Usefulness of Photographic Film in Roentgen Dosimetry", *Am. J. Roentgenol. Radium Therapy Nuclear Med.*, 72 (1954), 293.

Erlich, M., "Photographic Dosimetry of X and Gamma Rays". *NBS Handbook* 57, (1954).

Dudley, R.A., "Photographic Detection and Dosimetry of Beta Rays". *Nucleonics* 12, No. 5, (1954), 24.

Mc Laughlin, W.L., and Erlich, M., "Film Budge Dosimetry: How Much Fading Occurs?", *Nucleonics* 12, No. 10, (1954), 34.

Hine, G.J., and Brownell, G.L., "Radiation Dosimetry", *Academic Press Inc.*, New York, (1956), Chap. 7.

American Standard Association, Inc., "Method for Evaluating Films for Monitoring X-Rays and Gamma Rays Having Energies up to 2 MeV", PH2, 10, (1956).

Kodak, Eastman, "Radiography in Modern Industry". 2nd Ed., (1957).

James, T.H., and Hamilton, J.F., "The Photographic Process". *International Science and Technology*, June 1965.

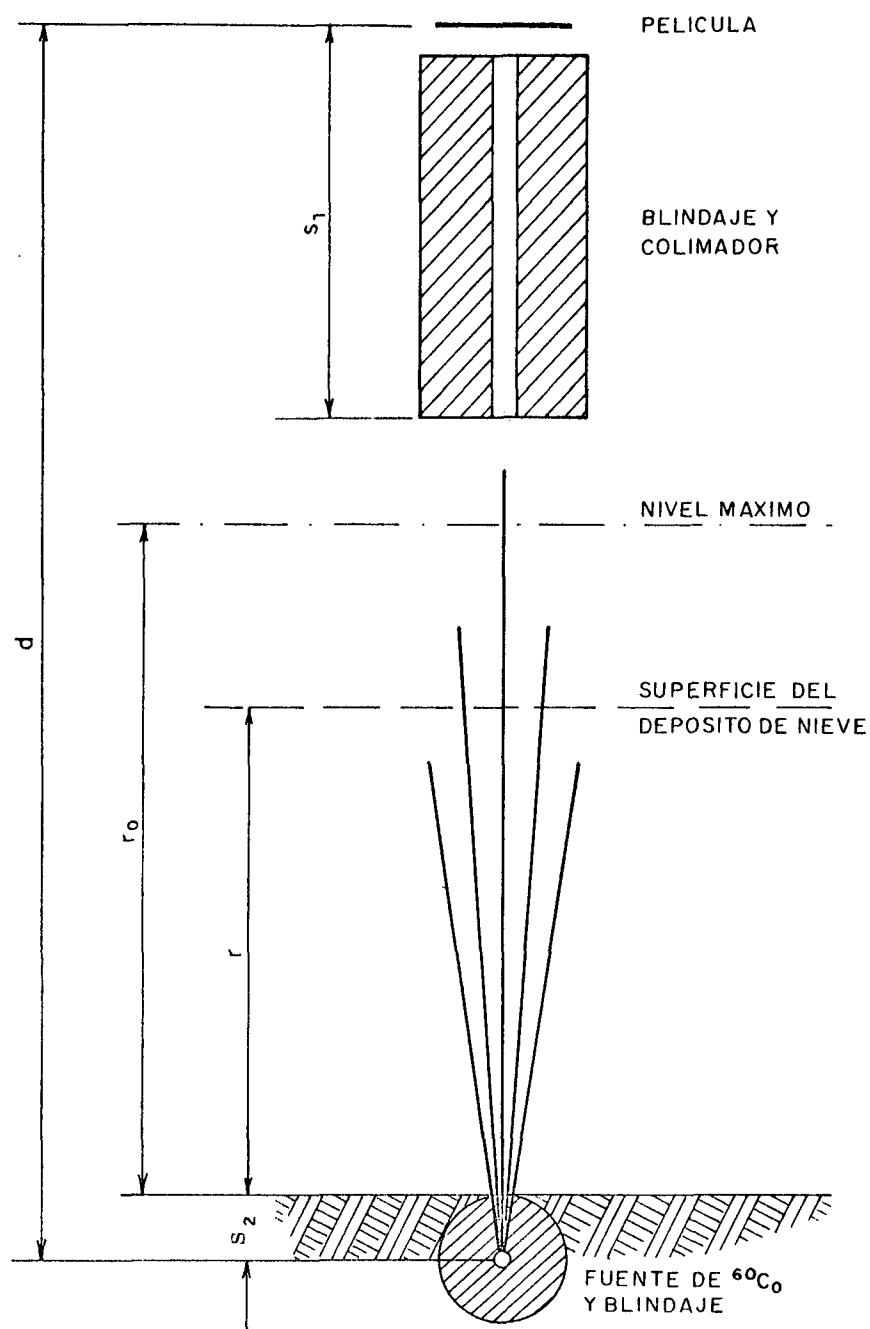


Fig. 1. Geometría y notación para estudiar el principio de medición del nivómetro.

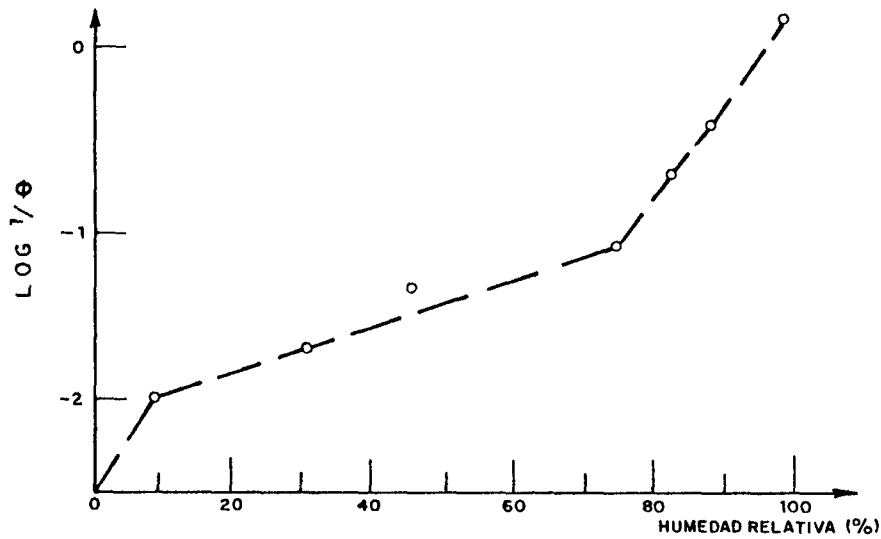


Fig. 2 Variación de θ , tiempo necesario para reducir la densidad del grano a la mitad, con la humedad relativa (Albouy y Faraggi, 1949).

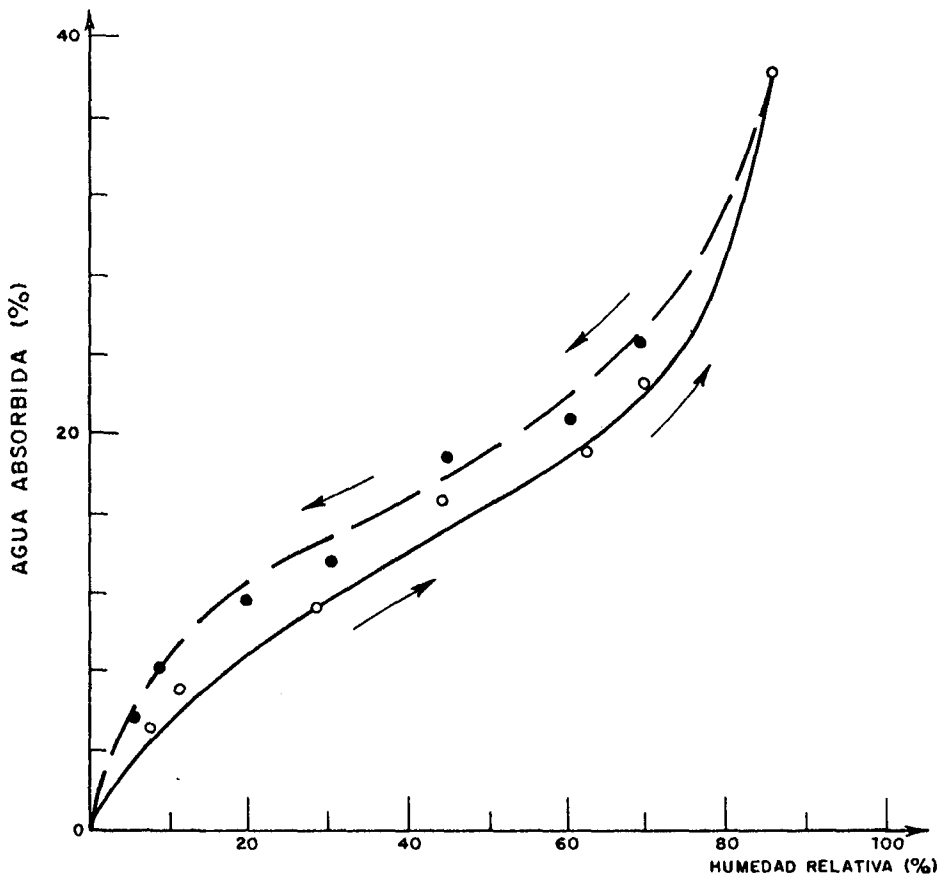


Fig. 3 Relación entre la humedad absorbida por gelatina seca y la humedad relativa (Mees, 1942).

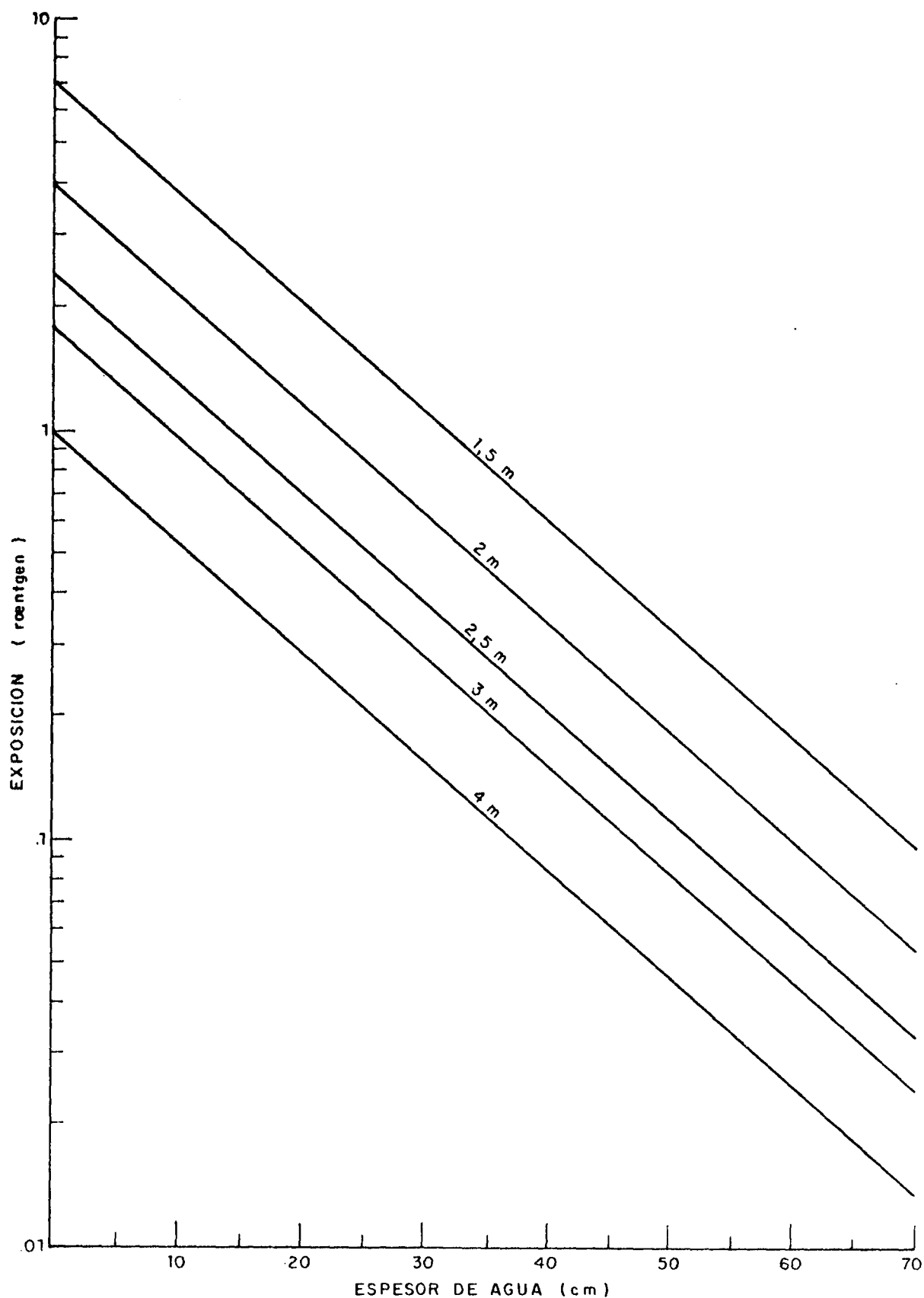


Fig. 4. Exposición en función del espesor de agua para diferentes distancias fuente-película. Tiempo de irradiación 24 horas. Fuente radiactiva 0,5 c de ^{60}Co .

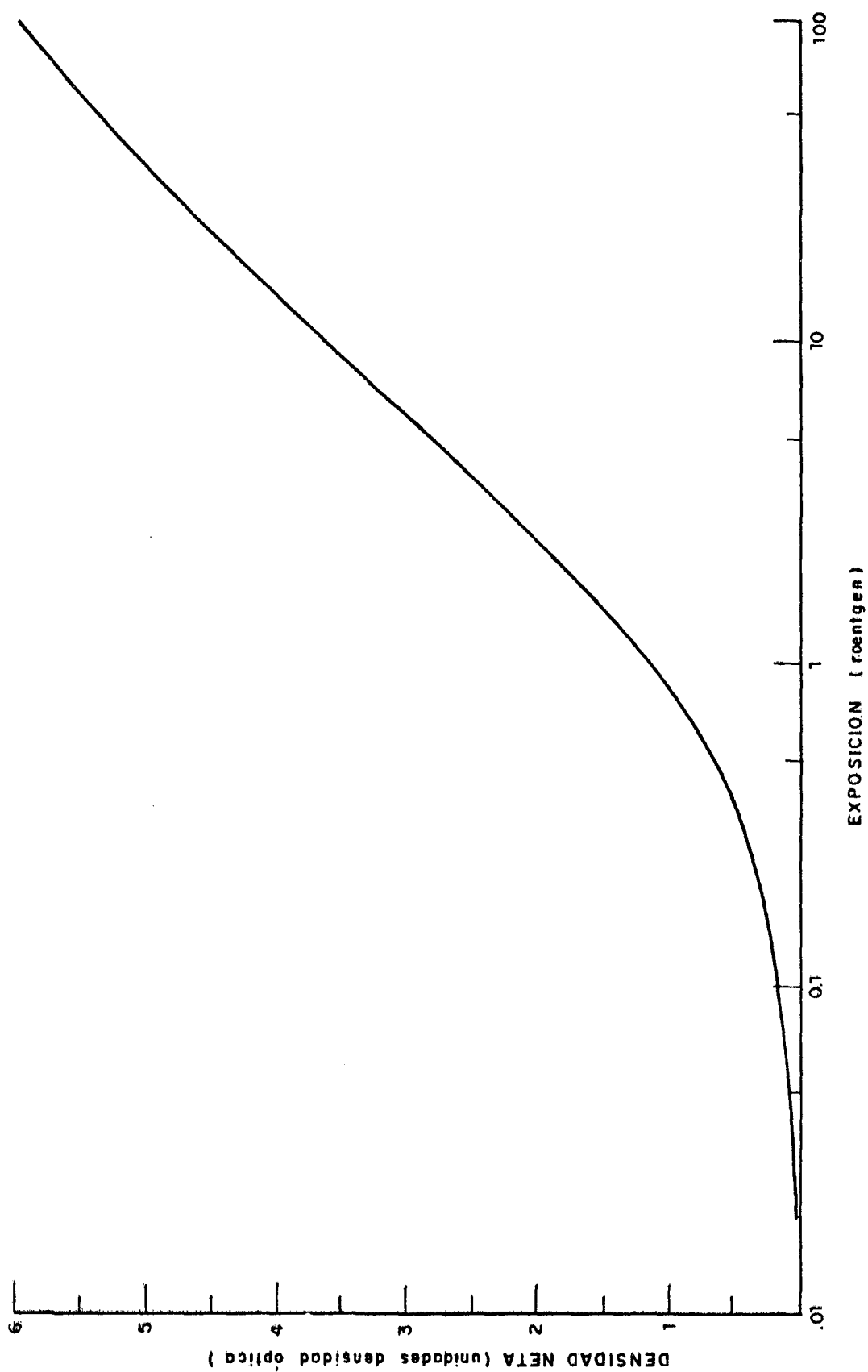


Fig. 5. Curva característica para película DUPONT tipo 555 expuesta a radiación de ^{60}Co .

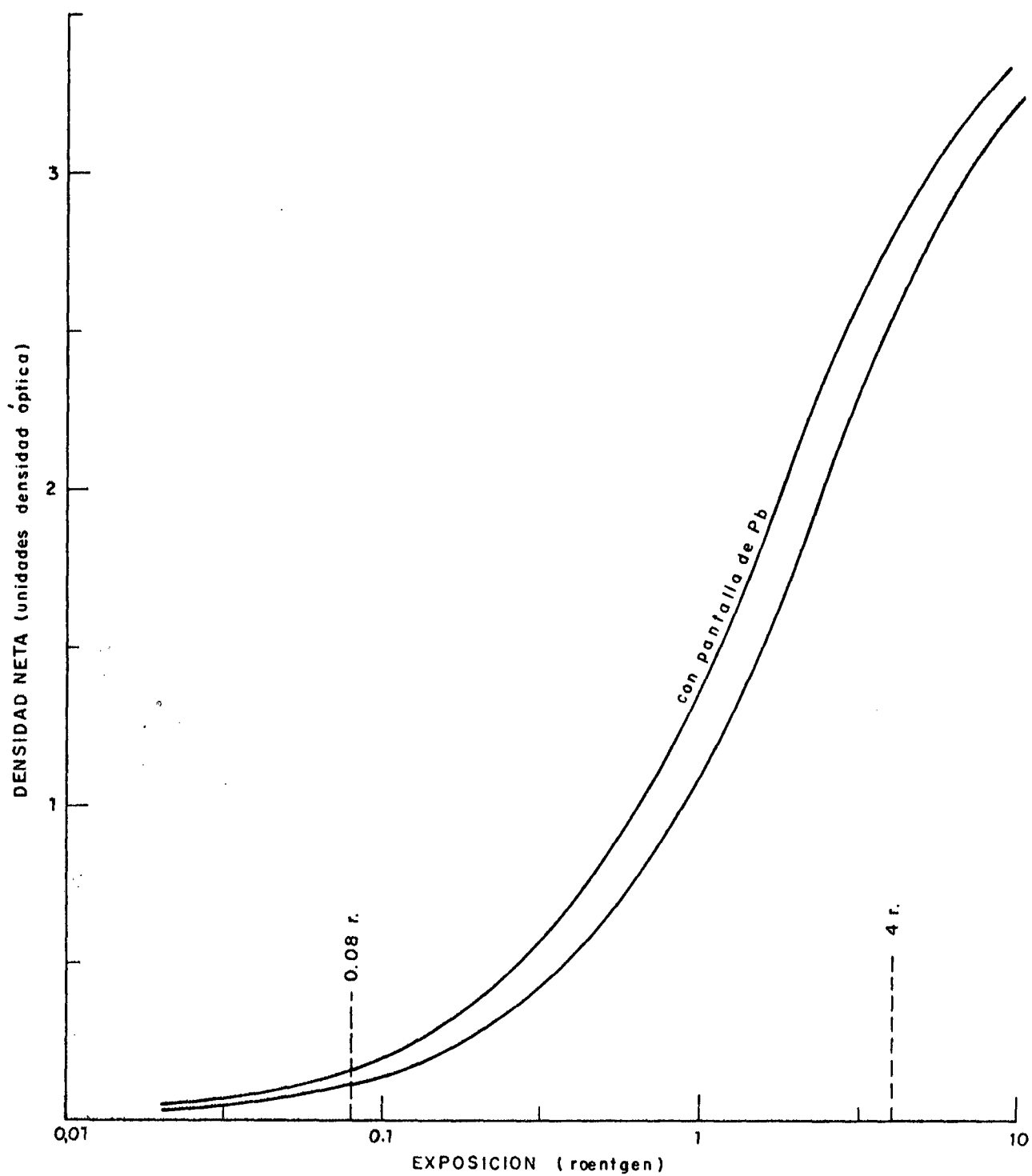


Fig. 6. Curvas características para película ILFORD INDUSTRIAL A expuesta a radiación de ^{60}Co .

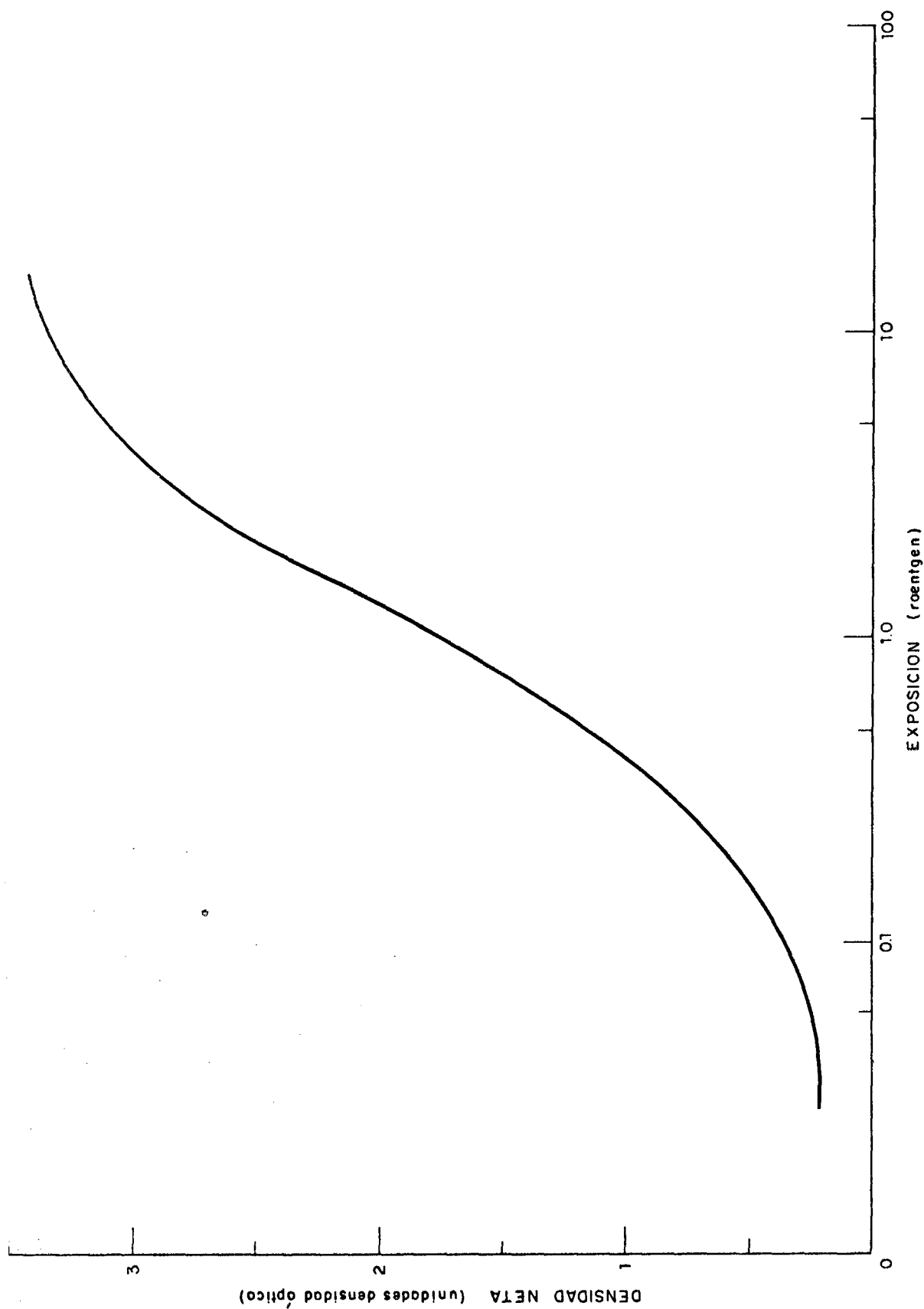


Fig. 7 Curva característica de la película radiográfica industrial Anscop Superay D, expuesta con ^{60}Co , usando pantallas intensificadoras.

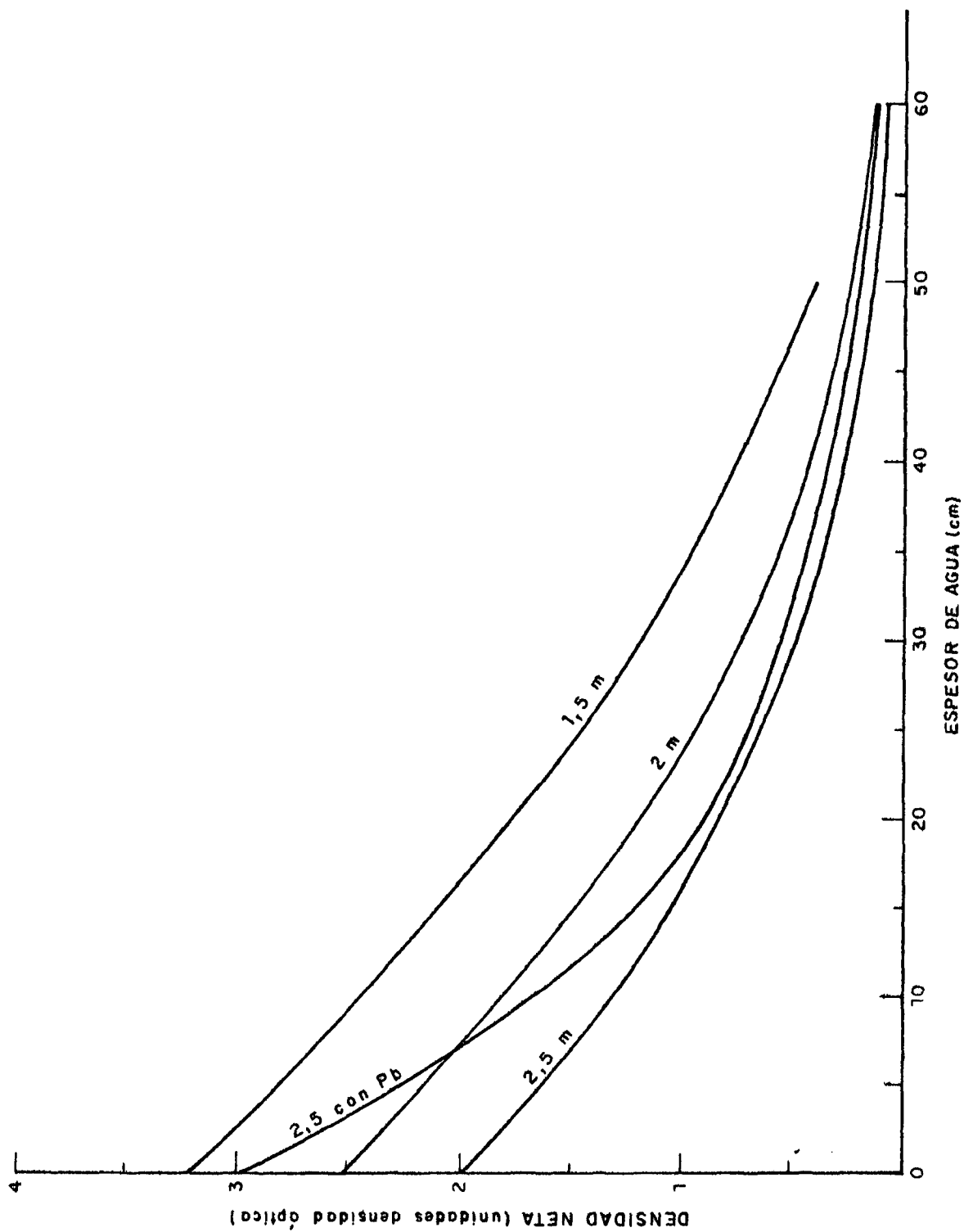


Fig. 8 Curvas de calibración de la película DUPONT Tipo 555 irradiada 24 hs con ^{60}Co . La distancia fuente-placa se indica en las curvas.

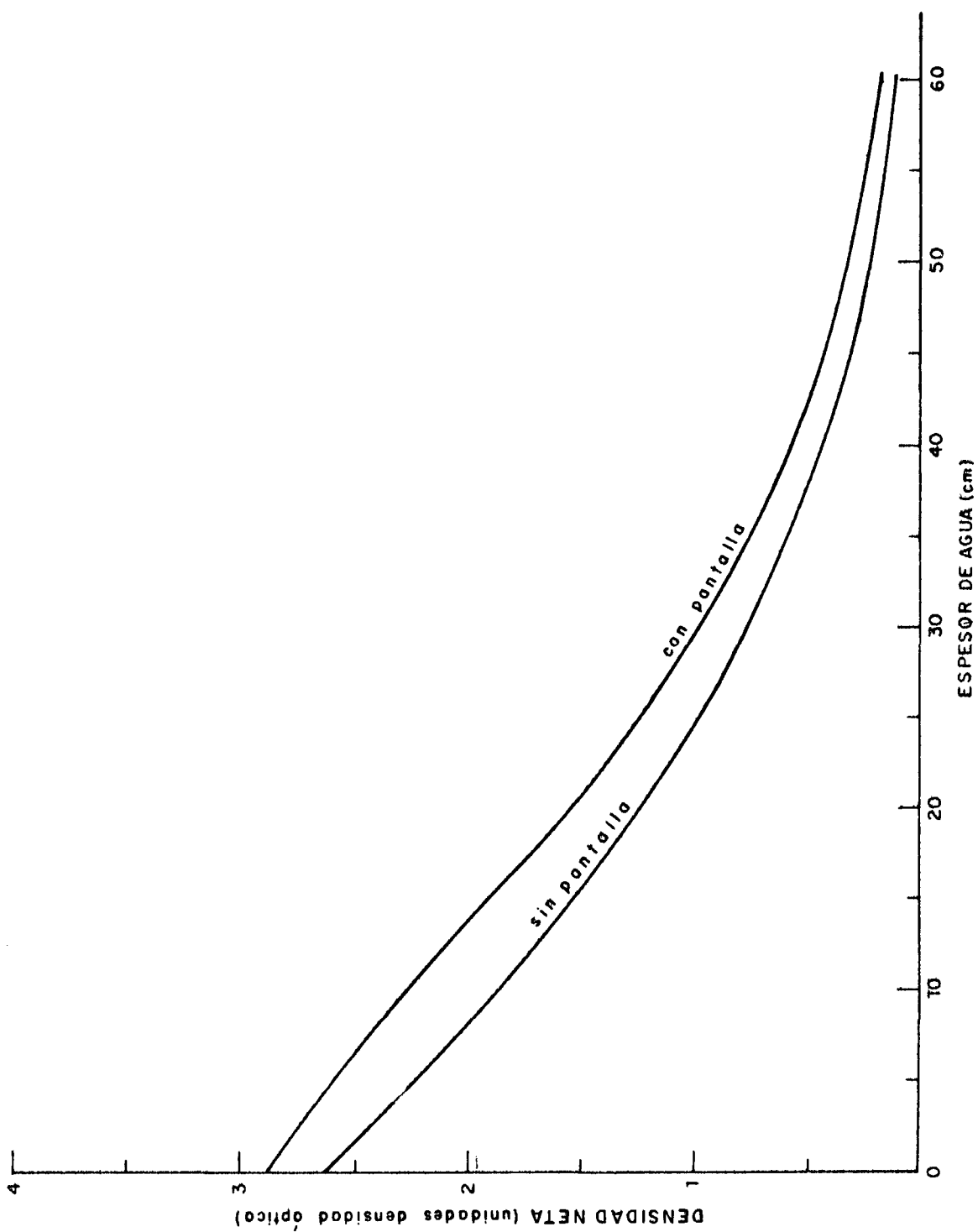


Fig. 9 Curvas de calibración de la película ILFORD INDUSTRIAL A irradiada 24 hs con 0,5 c de ^{60}Co , con y sin pantalla reforzadora de plomo (0,25 mm de espesor) detrás del film. Distancia fuente-placa 2 m.

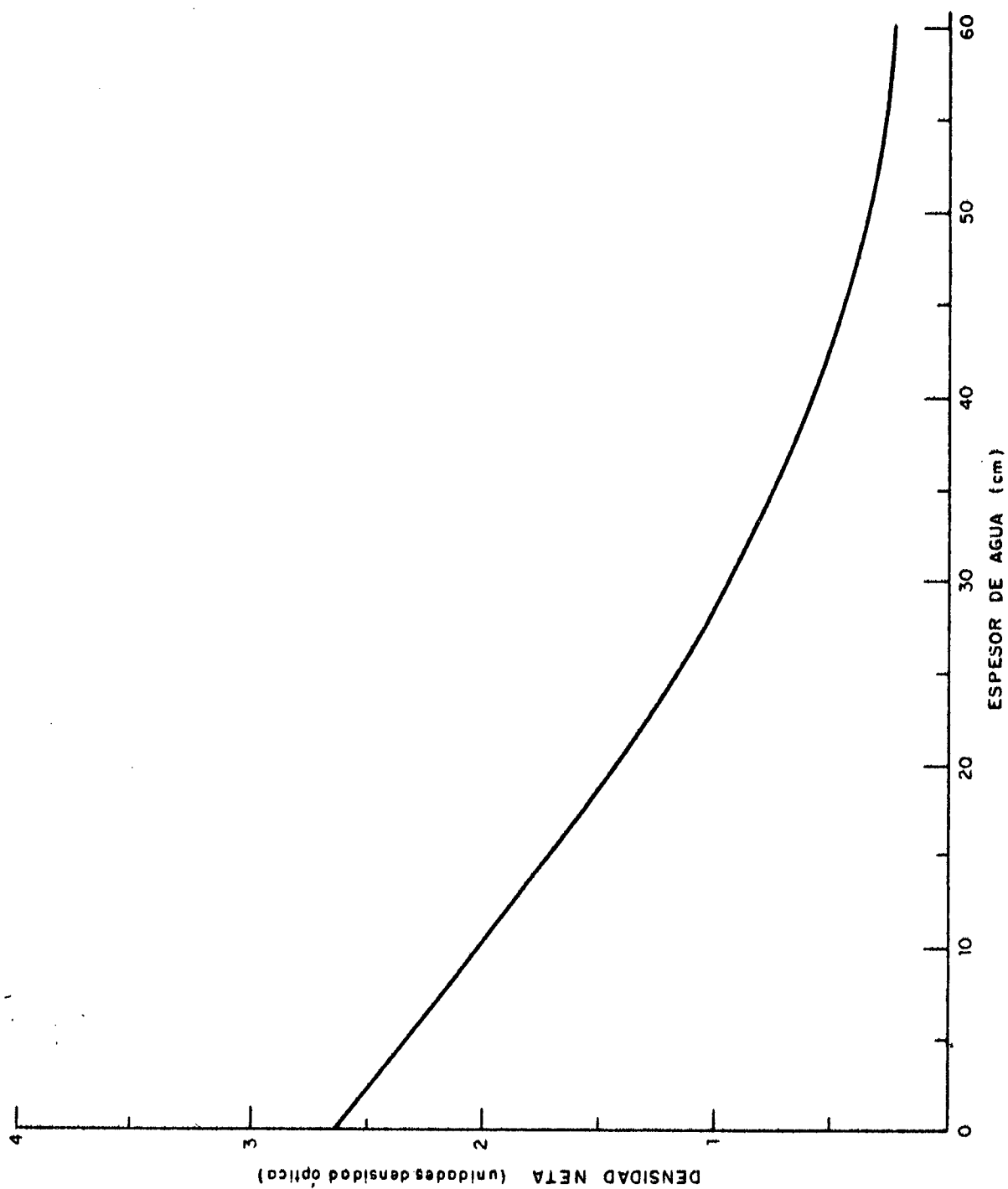


Fig. 10. Curva de calibración para película radiográfica Ansco Superay D, con pantallas intensificadoras, expuesta 24 horas con 0,5 c de ^{60}Co . Distancia fuente-placa 2,5 m.

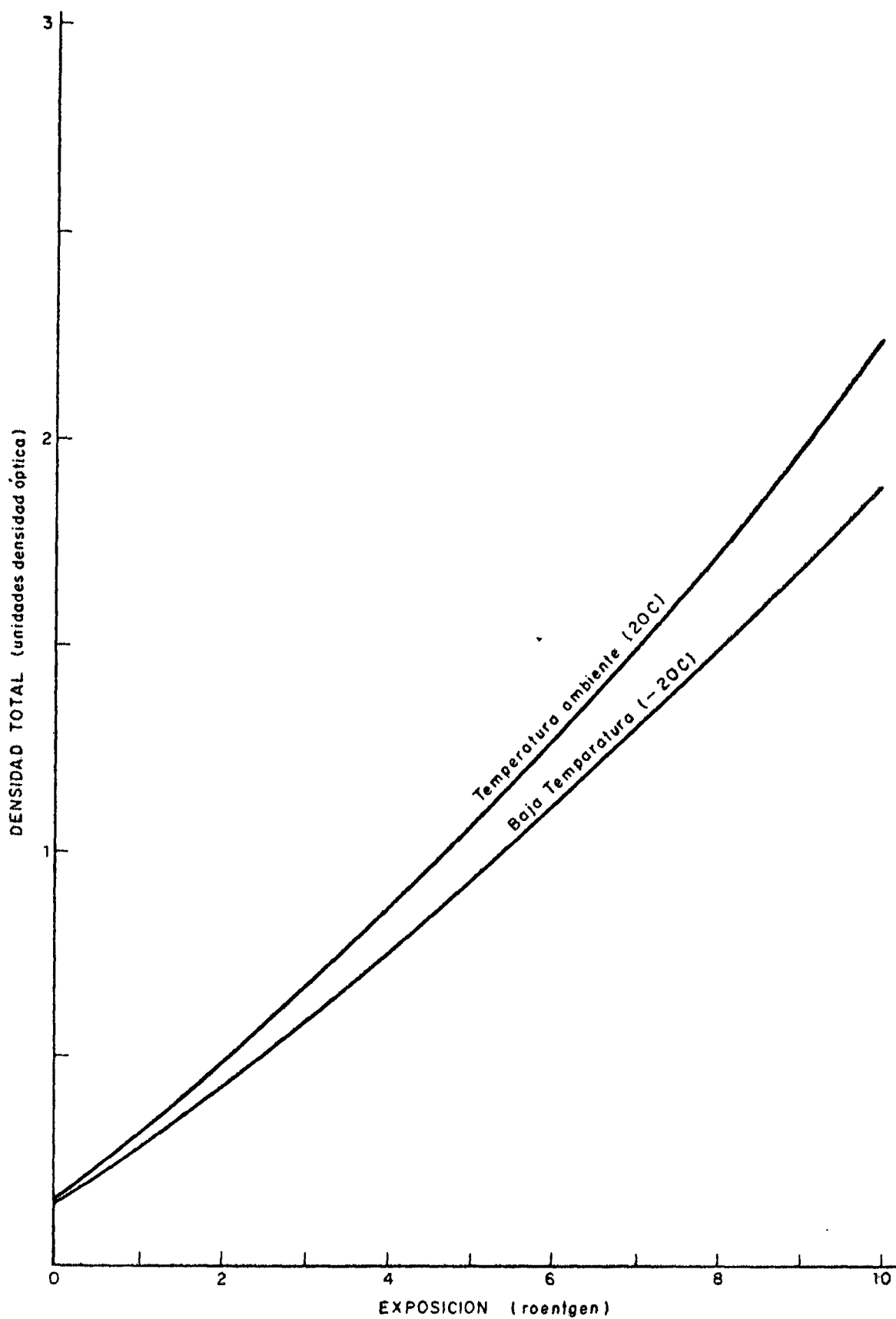


Fig. 11 Influencia de la baja temperatura en la respuesta de una película radiográfica a la radiación de ^{60}Co .

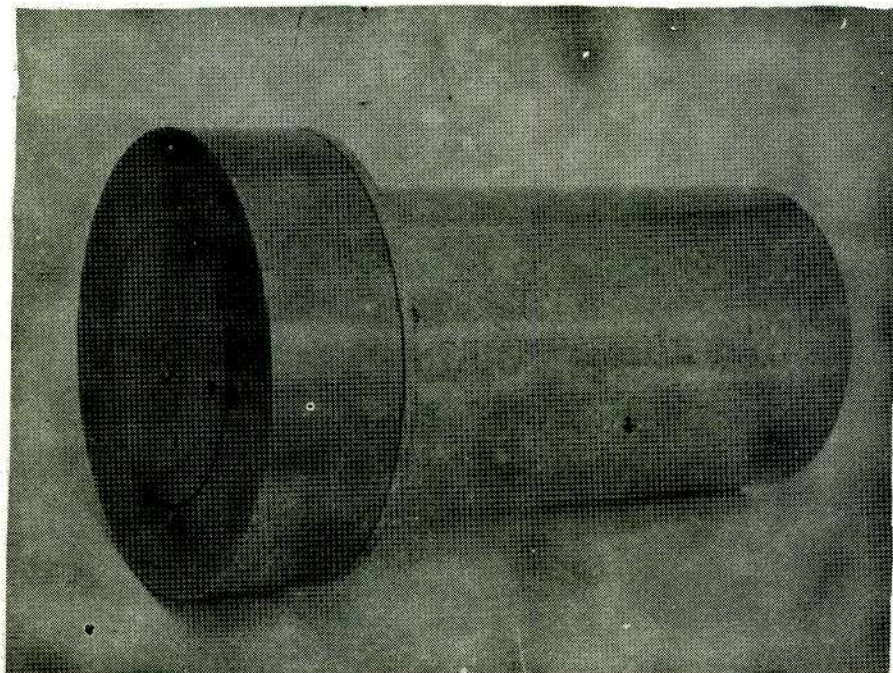


Fig. 12. Dispositivo experimental para la irradiación de películas, simulando las condiciones del nivómetro.

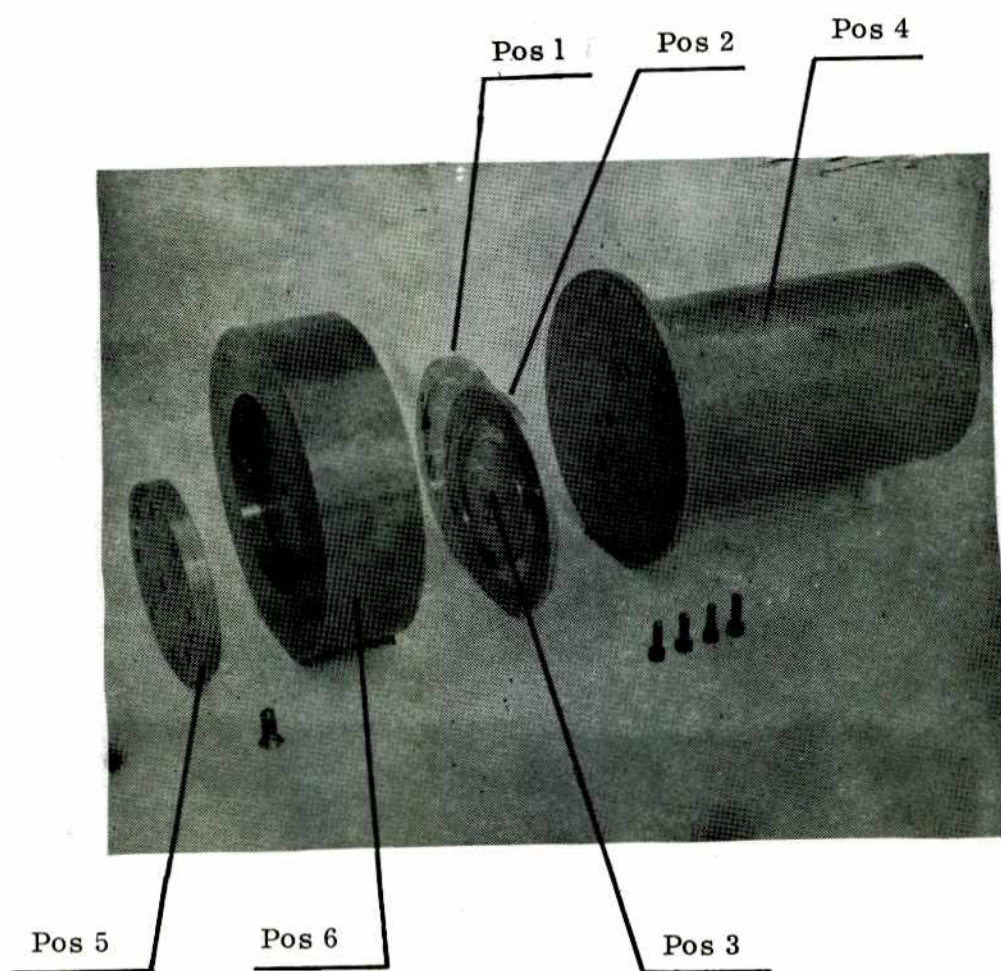


Fig. 13. Partes componentes del dispositivo experimental. Pos 1: soporte de la película; Pos 2: tapa del soporte; Pos 3: pantalla reforzadora; Pos 4: blindaje y colimador; Pos 5: irradiador; Pos 6: colimador del irradiador.

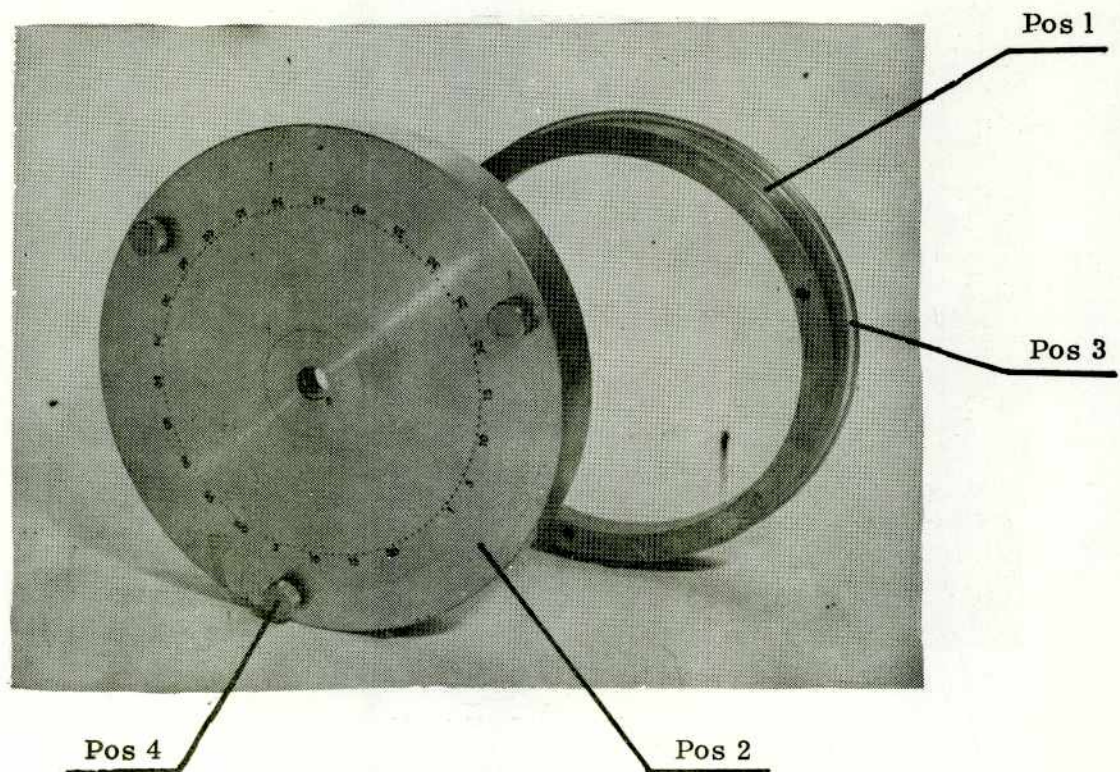


Fig. 14 a. Unidad de detección. Pos 1: porta-película; Pos 2: tapa; Pos 3: aro de neoprene; Pos 4: tornillo de cierre.

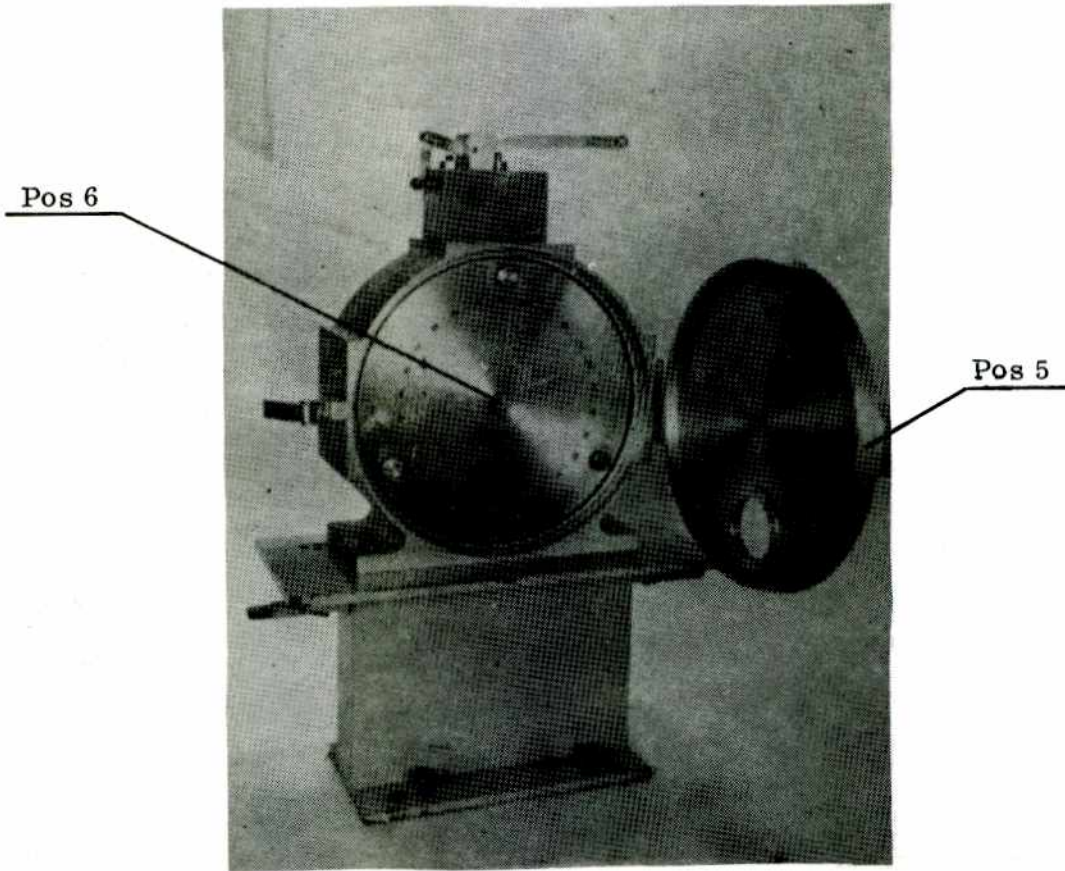


Fig. 14 b. Unidad de detección. Pos 5: puerta;
Pos 6: tornillo de acoplamiento.

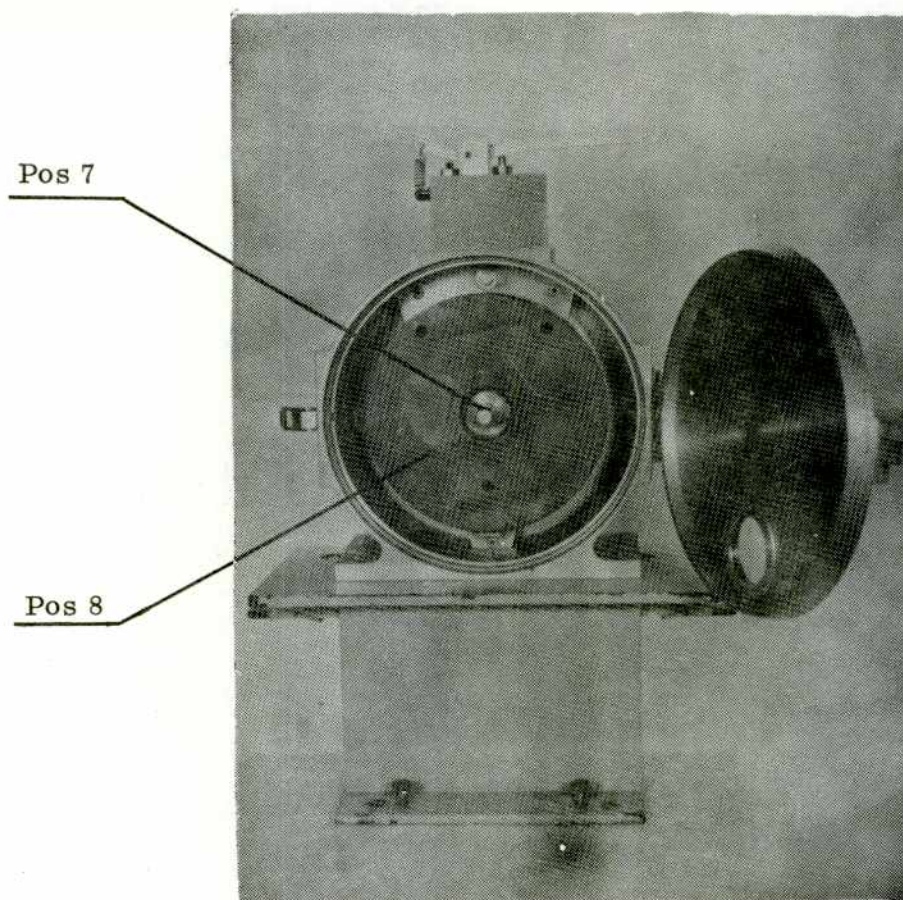


Fig. 14 c. Unidad de detección. Pos 7: eje motriz;
Pos 8: blindaje anular de plomo.

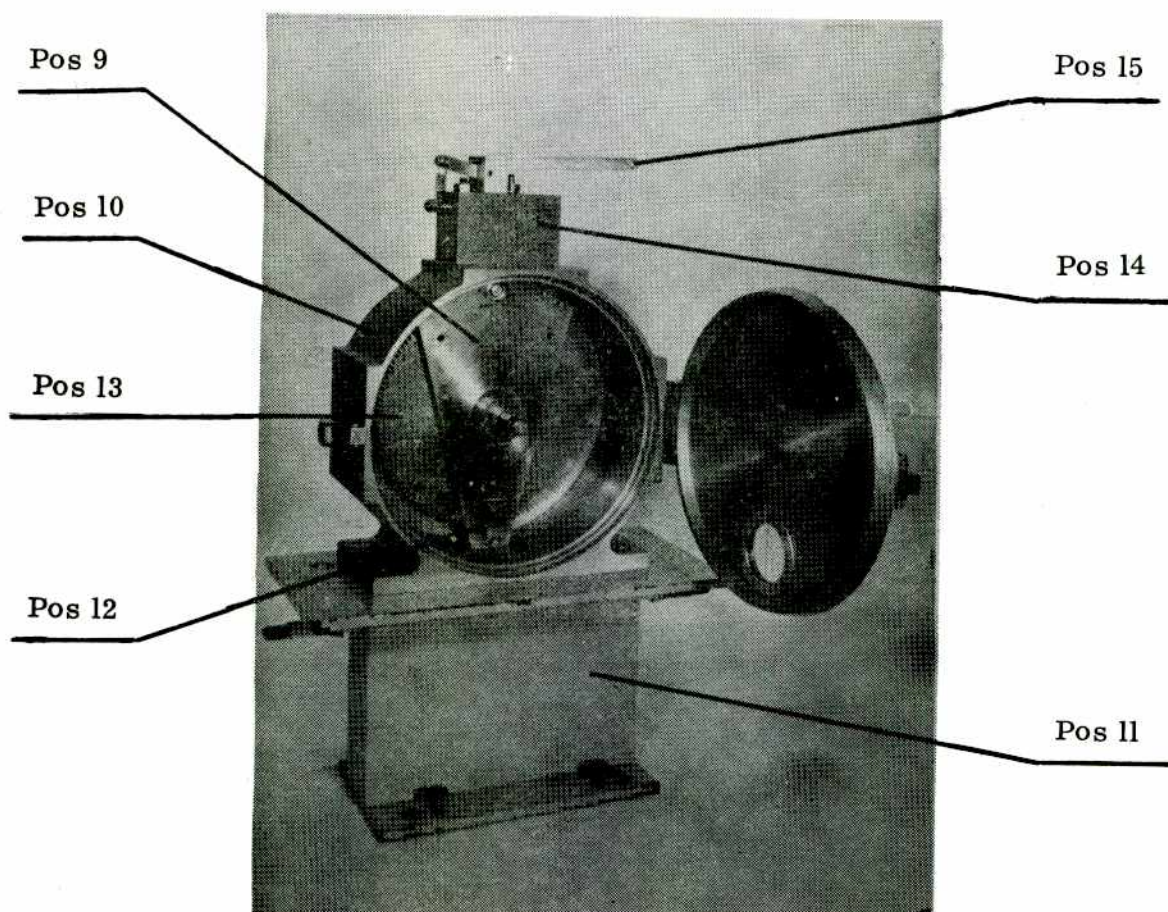


Fig. 14 d. Unidad de detección. Pos 9: bastidor; Pos 10: carcasa de fundición; Pos 11: blindaje y colimador; Pos 12: fuente de referencia; Pos 13 corona; Pos 14: impulsor neumático; Pos 15: palanca para operación manual.

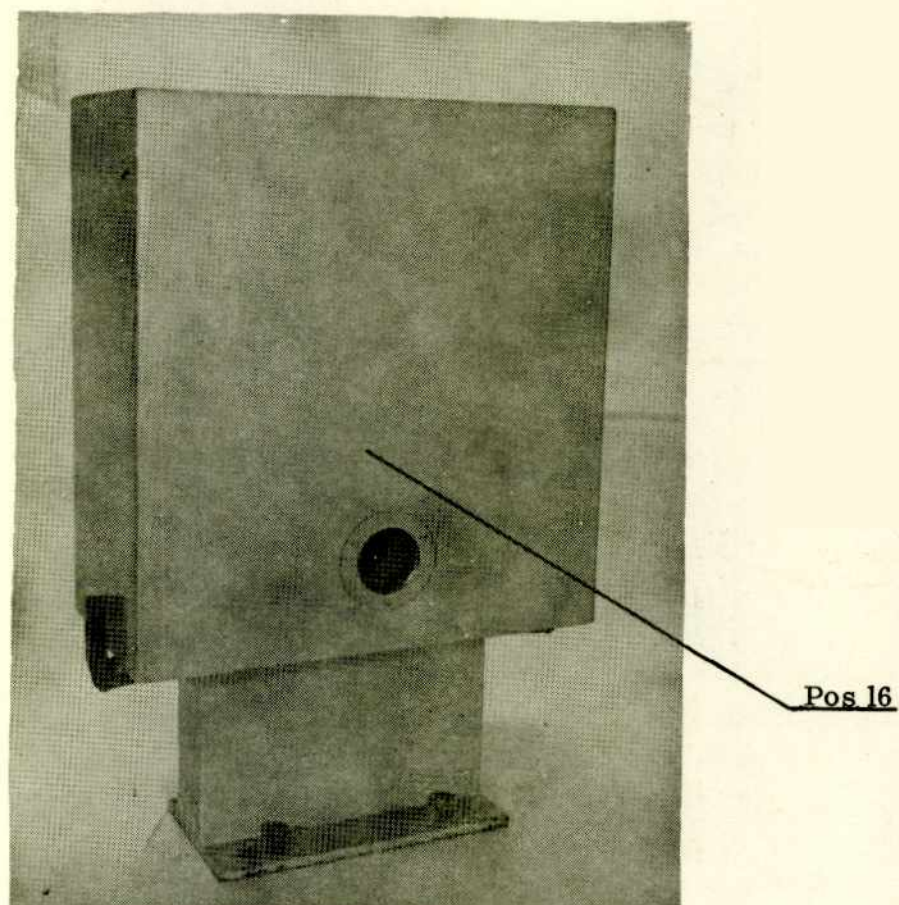


Fig. 14 e. Unidad de detección. Pos 16: cubierta de protección.



EXPOSICION DE REFERENCIA
20 uc ^{90}Sr .

EXPOSICION DE MEDICION

Fig. 15 a. Registro radiográfico del nivómetro
para película Dupont Cronex 506.



EXPOSICION DE REFERENCIA
10 uc ^{90}Sr .

EXPOSICION DE MEDICION

Fig. 15 b. Registro radiográfico del nivómetro
para película Dupont Cronex 506.



EXPOSICION DE REFERENCIA
10 uc ^{90}Sr .

EXPOSICION DE MEDICION

Fig. 15 c. Registro radiográfico del nivómetro
para película Ansco Superay B.

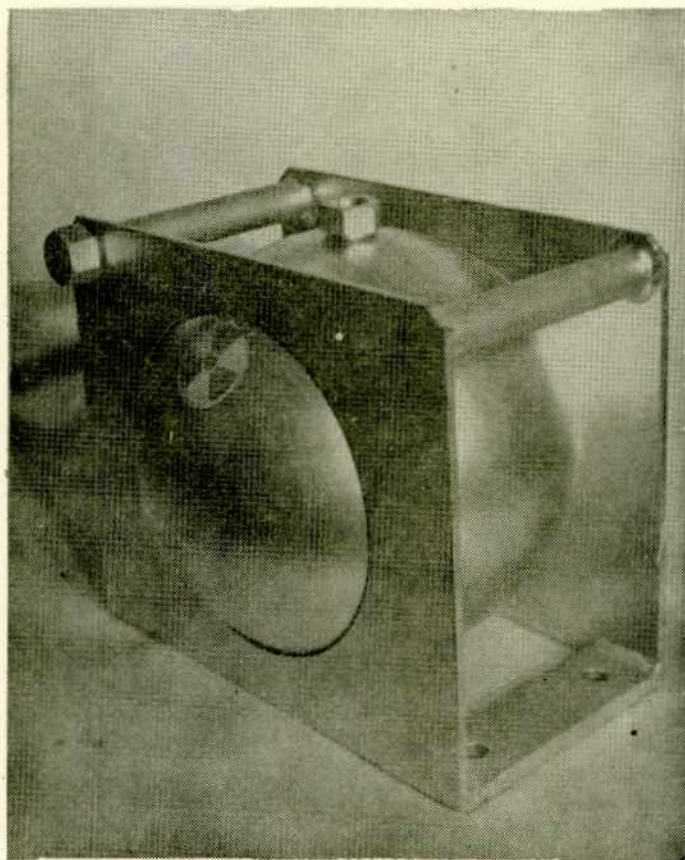


Fig. 16. Unidad de irradiación del nivómetro.

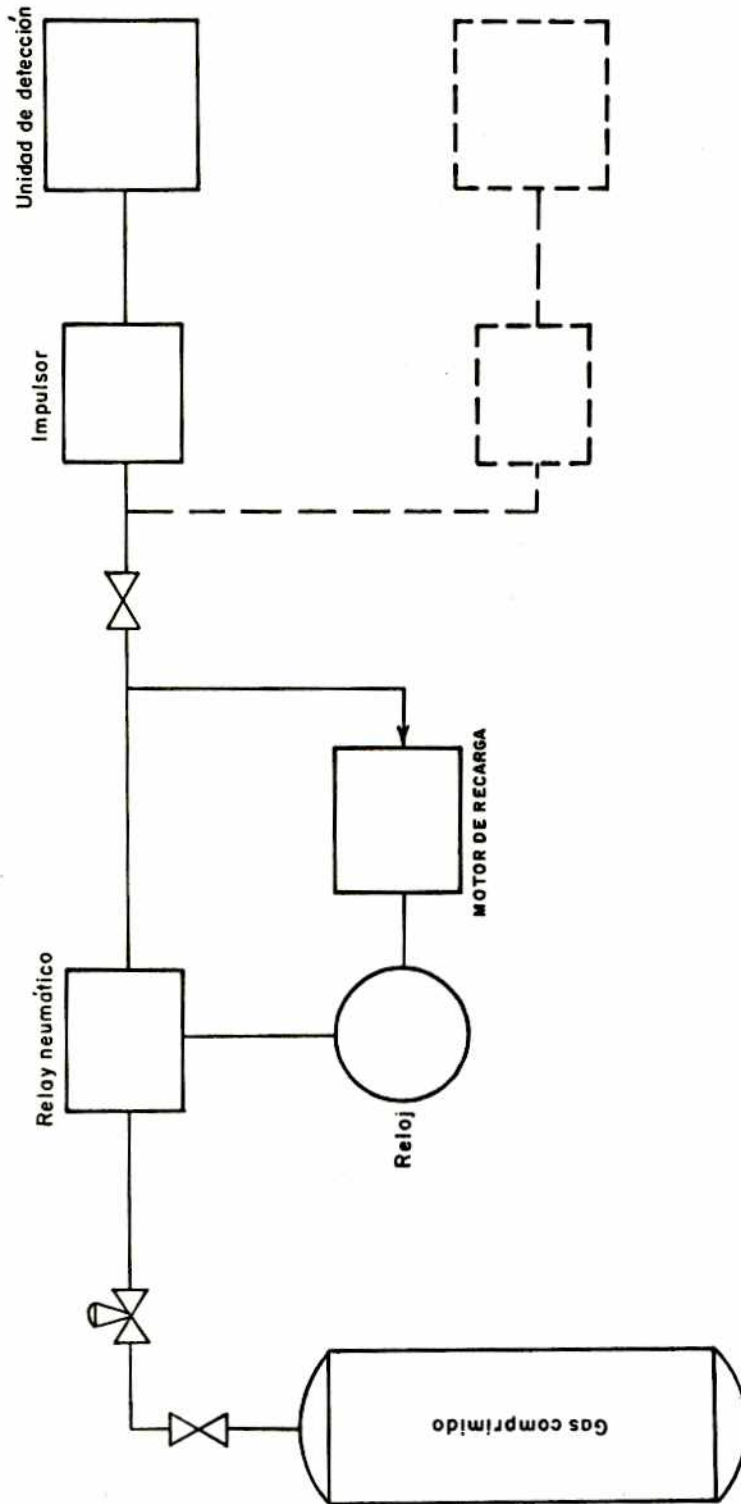


Fig. 17 Diagrama en bloques del sistema de localización del film.

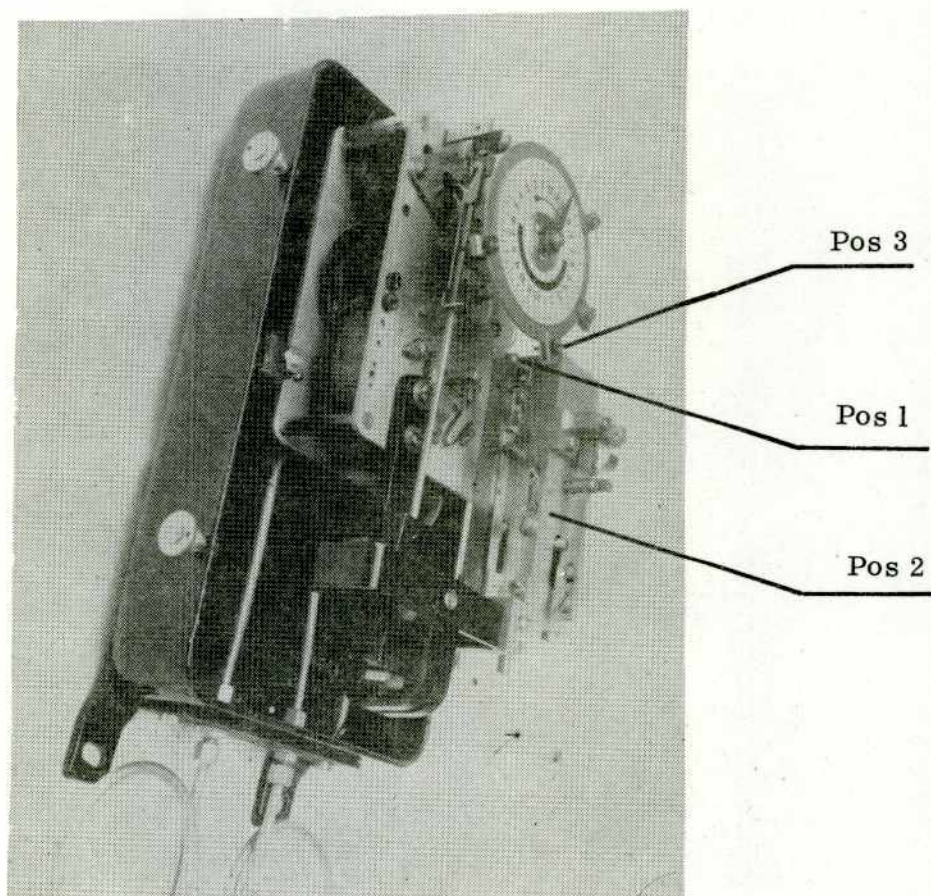


Fig. 18. Unidad de programación. Pos 1: palanca del relay;
Pos 2: relay neumático; Pos 3: leva.

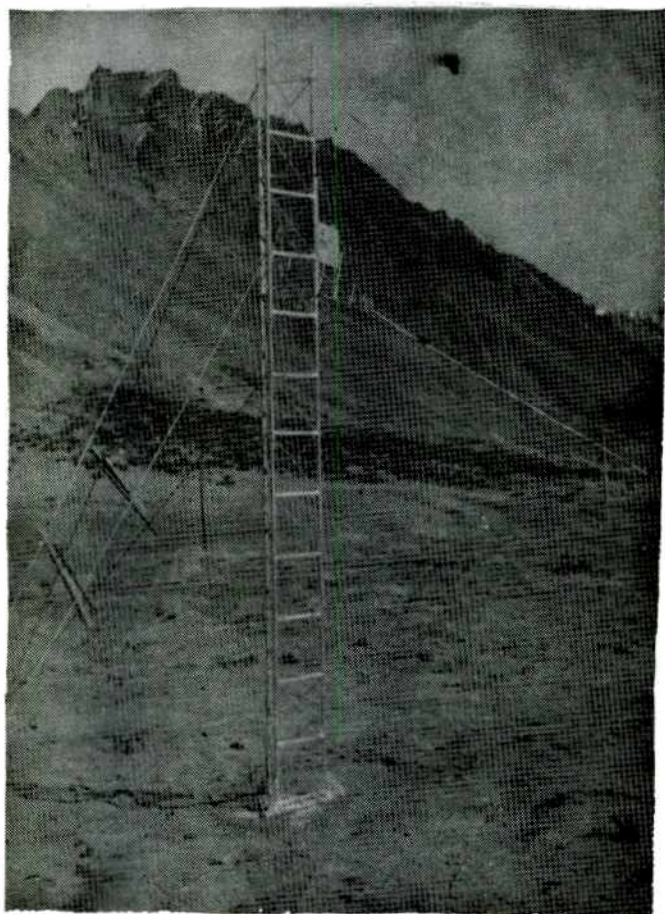


Fig. 19. Estructura de instalación.

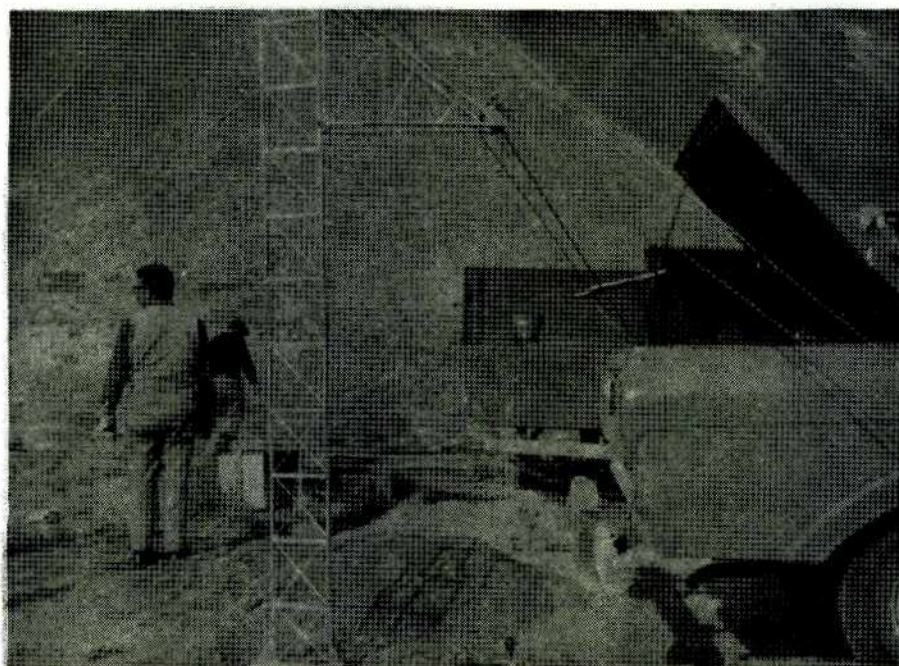


Fig. 20. Montaje de la unidad de irradiación. La alineación vertical se ejecuta con una plomada.

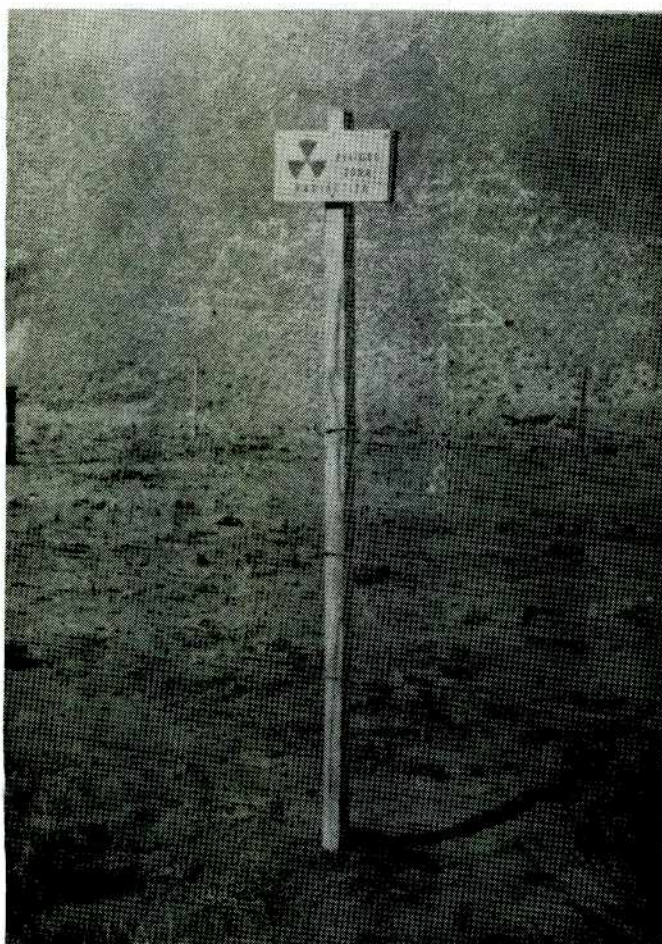


Fig. 21. Demarcación de la zona de ensayo con alambrada y señales para prevenir riesgos de irradiación.



Fig. 22 a. Vista general del lugar del ensayo. El helicóptero se usó para el transporte del personal y equipo.

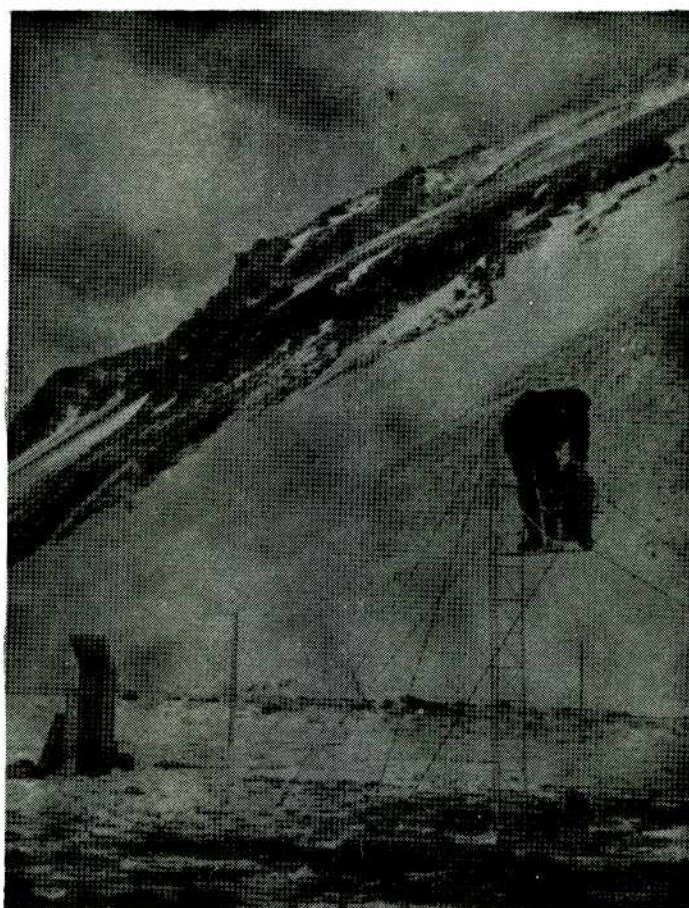


Fig. 22 b. Montaje de la unidad de detección.

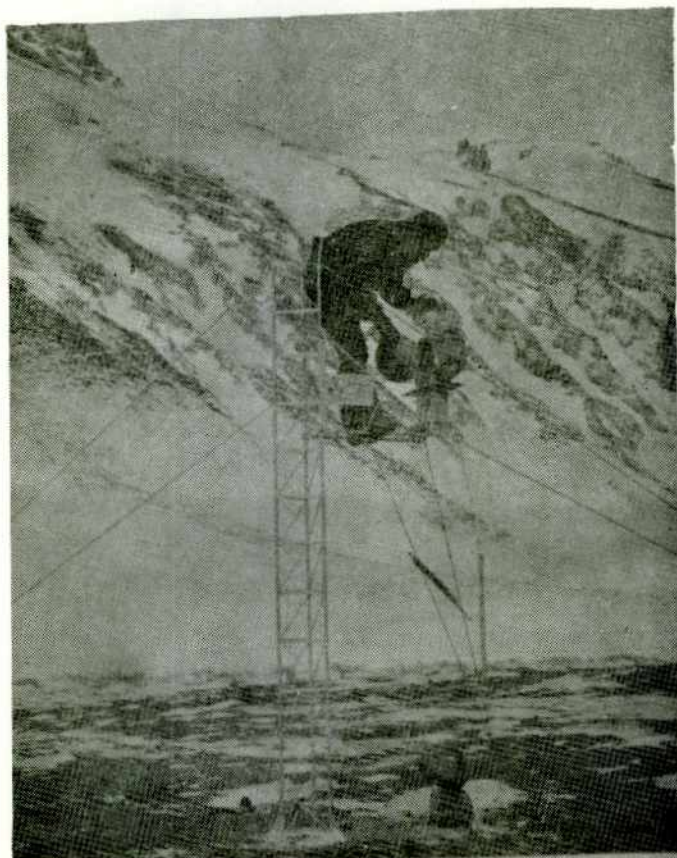


Fig. 22 c. Colocación del tambor porta-film en la unidad de detección.



Fig. 22 d Acoplamiento del tambor al eje motriz de la unidad de detección.

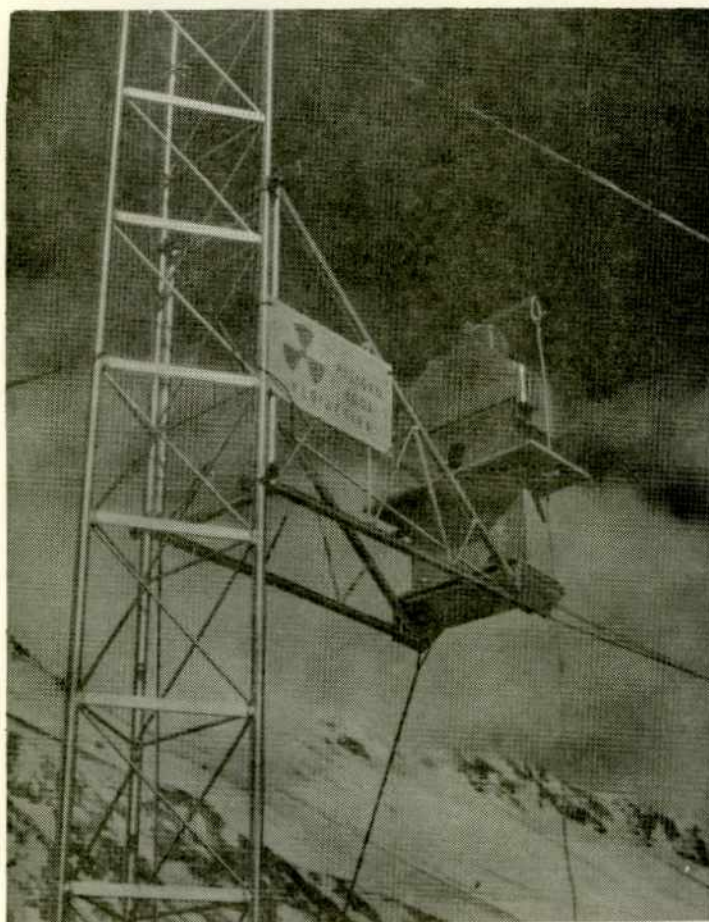


Fig. 22 e. Unidad de detección sin cubierta protectora.

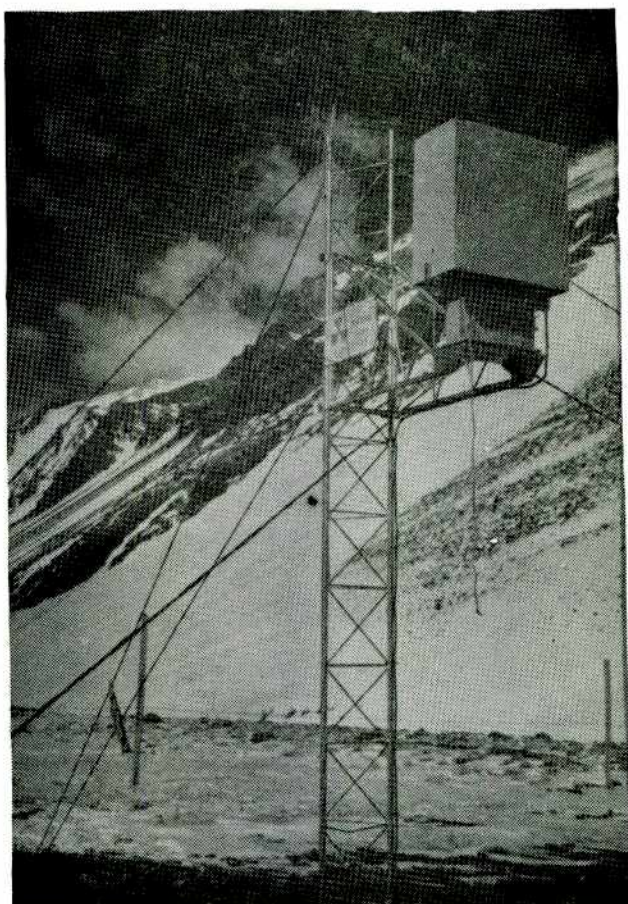


Fig. 22 f. Unidad de detección armada.



Fig. 22 g. Montaje del cilindro de argón comprimido que suministra la energía para el movimiento de la unidad de detección.



Fig. 22 h. Nivómetro instalado.