

# BOLETIN

de la

## Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración

---

### S U M A R I O

Los Principios, Diseño y Operación de un Magnetómetro de Libre Precesión del Protón, por *W. E. Bell y J. M. Drake* (traducido del inglés por el Ing. Enrique del Valle T.).

Principios que se Utilizan en el Magnetómetro de Precesión Libre Nuclear, por el Ing. *Enrique del Valle T.*

La Difracción como Medio de Interpretación Sismológica, por el Ing. *Armando Eguía H.* y el Ing. *J. L. A. Orozco.*

#### “FORO ABIERTO”

Desventajas en el Empleo de Filtros de Paso de Banda Ancha, por el Ing. *Antonio C. Limón.*

Nuevos Socios.

Nota necrológica.

Contribuyentes.

# ASOCIACION MEXICANA DE GEOFISICOS DE EXPLORACION

## *MESA DIRECTIVA PARA EL PERIODO 1961-1962*

Presidente: Santos Figueroa Huerta.

Vice-Presidente: Guillermo Hernández Moedano.

Secretario: Alfonso Cornejo Toledo.

Tesorero: Thomas Ortiz.

Vocal de Petróleo: Jesús Basurto García.

Vocal de Minas: Guillermo P. Salas.

Vocal de Ingeniería Civil: Juventino Islas Leal.

Editor: Vladimir A. Olhovich.

Coeditores: Armando Eguía Huerta y Antonio Cordero Limón.

Presidente Directivo Anterior: Antonio García Rojas.

---

Este Boletín se publica cada tres meses y se distribuye gratuitamente a los socios.

El precio de suscripción para no socios es de \$ 150.00 m/n al año y  
de \$ 50.00 m/n número suelto.

---

Para todo asunto relacionado con el Boletín: manuscritos, asuntos editoriales, suscripciones, descuentos especiales a bibliotecas públicas o de Universidades, publicaciones, anuncios, etc., dirigirse a:

ING. VLADIMIR A. OLHOVICH  
Av. Juárez No. 97 Despacho 302.

Teléfonos 18-41-41 y 12-89-70

México 1, D. F.

# LOS PRINCIPIOS, DISEÑO Y OPERACION DE UN MAGNETOMETRO DE LIBRE PRECESION DEL PROTON

Por *W. E. Bell y J. M. Drake (\*)*

Palo Alto, California.

Varian Associates,

## RESUMEN

La precesión libre nuclear puede medir el valor absoluto de débiles campos magnéticos homogéneos con rapidez y precisión. En este artículo se presenta un resumen de los principios básicos que condujeron al diseño de magnetómetros de uso práctico, y las normas para lograr un magnetómetro portátil con sensitividad de  $\pm 1.25 \times 10^{-5}$  gauss en mediciones del campo magnético terrestre.

## INTRODUCCION:

La observación del magnetismo nuclear por el grupo de Bloch en Stanford (1) e independientemente por el grupo de Purcell (2) en Harvard suministró al investigador un método bien fundado para medir campos magnéticos intensos con una alta precisión absoluta (3, 4, 5). La extensión del uso del magnetómetro nuclear original a la medición de campos magnéticos débiles fue demostrado primeramente por Packard y Varian mediante su experimento de precesión libre nuclear (6). A fin de desarrollar los parámetros prácticos de un aparato para la medición de campos débiles basado en los fenómenos de precesión libre, es útil revisar el comportamiento del sistema giratorio nuclear dentro de un campo magnético.

\* Empleado ahora en Lockheed Missiles and Space Division, Palo Alto, California.

## II.—PRINCIPIOS DE RESONANCIA MAGNETICA Y PRECESION NUCLEAR LIBRE

Las ecuaciones de movimiento de la magnetización nuclear están relacionadas con los fenómenos de precesión y de relajación. El proceso de relajación se define de acuerdo con Bloch (1), como sigue:

$$\frac{\vec{dM}}{dt} = -\frac{\vec{M} - \vec{X} \vec{H}}{T} \quad 1$$

donde  $X$  es la susceptibilidad nuclear y  $T$  es el tiempo de relajamiento compuesto de  $T_1$ , la constante de tiempo para el incremento, y  $T_2$  para el decaimiento de la magnetización inducida,  $M$ . En la ecuación (1) hemos hecho la suposición simplificadora de que  $T_1 + T_2 = T$ . La precesión que resulta de par producido por un campo magnético externo  $H$  sobre el momento nuclear se describe por:

$$\frac{\vec{dM}}{dt} = \gamma (\vec{M} \times \vec{H}) \quad 2$$

donde  $\gamma$  es la relación giromagnética del núcleo. Una combinación de las ecuaciones (1) y (2) da origen a la "ecuación de Bloch".

$$\frac{\vec{dM}}{dt} = \frac{\vec{M} - \vec{X} \vec{H}}{T} = \gamma (\vec{M} \times \vec{H})$$

Esta ecuación puede describir tanto un incremento de la magnetización  $M$ , en un campo intenso como una precesión amortiguada.—Por ejemplo si la magnetización  $M$  está inicialmente en la dirección de un campo magnético  $H$  tal como el de la tierra, que se muestra en la Figura 1-A, y solamente cambiamos el valor de este campo entonces no podrá haber precesión: todo lo que puede suceder es que  $M$  cambie su valor con la constante de tiempo  $T$ .

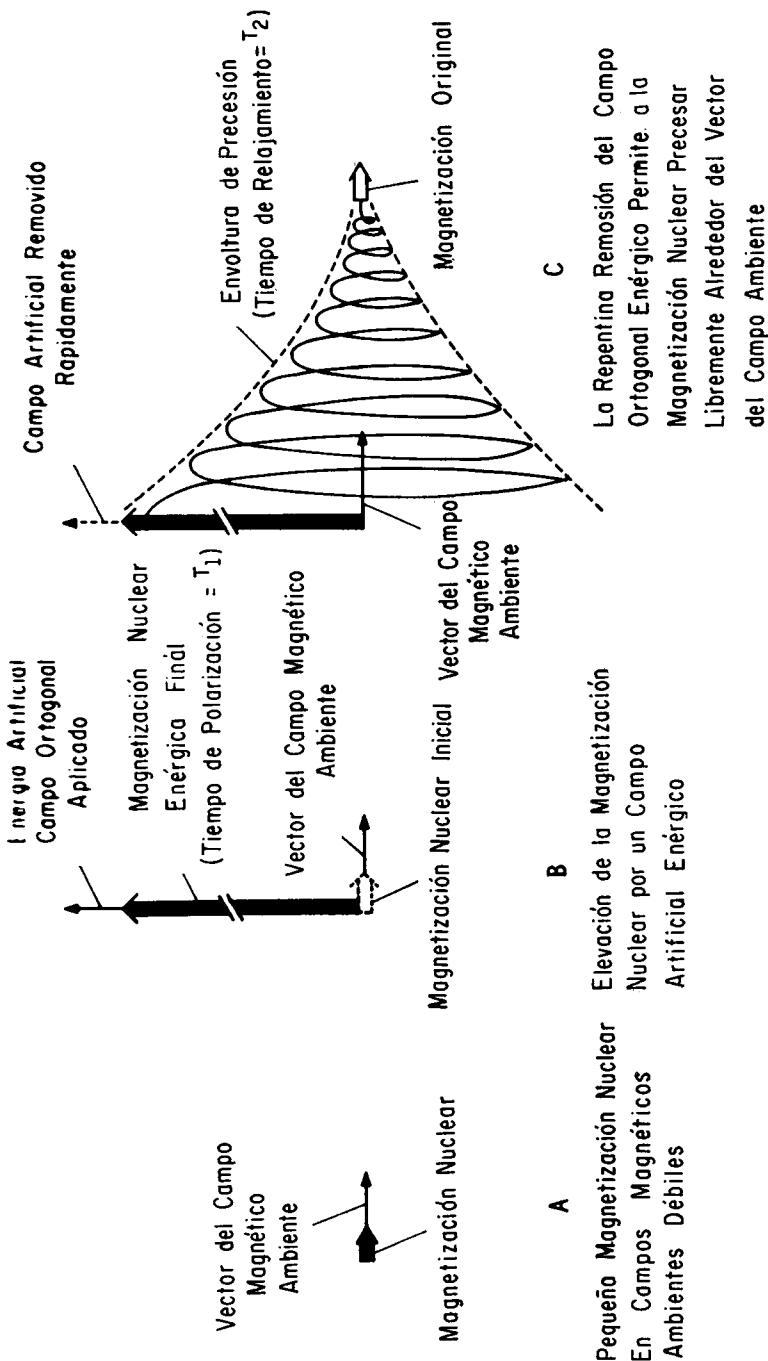


FIGURA 1

Por otra parte, si la dirección del campo fuera cambiada bruscamente por la aplicación de un campo intenso ( $H_p$ ) como el de la Figura 1-B, entonces se iniciará un movimiento precesional. Esta precesión se amortiguará también con una constante de tiempo  $T$  porque representa una condición de desequilibrio relativa a la nueva dirección del campo magnético. Mientras tanto se estará creando una nueva magnetización en dirección del nuevo vector de campo. En principio, la magnetización  $M$ , o polarización, puede hacerse tan grande como se quiera, dentro de los límites determinados por los aspectos prácticos de los campos magnéticos intensos producidos artificialmente. Una remoción brusca del campo intenso ( $H_p$ ) de la Figura 1-C exige que la fuerte magnetización inicial,  $M_i$ , inmediatamente empiece un movimiento de precesión alrededor de la dirección del campo terrestre con una frecuencia dada por la ecuación:

$$f = 8 \frac{He}{z \pi}$$
(4)

la cual se obtiene de resolver las ecuaciones diferenciales (2) y (3). La amplitud inicial de la precesión disminuirá hasta una fracción  $1/e$  de su valor original en un tiempo  $T$ , que es el tiempo de relajación. Sin embargo, la frecuencia de precesión durante el tiempo  $T$  será invariable con tal de que el valor  $He$  permanezca invariable, y sea una función lineal de la intensidad total de  $H$ . Nótese que la dirección del campo polarizador ( $H_p$ ) con respecto al campo magnético terrestre no influye en la determinación de la frecuencia de precesión, sino que únicamente establece la magnitud inicial de la magnetización inducida  $M_i$ .

### III.—PARAMETROS DE DISEÑO PARA UN MAGNETOMETRO PRACTICO

La aplicación de los principios de la precesión libre nuclear descritos en la Sección II, requiere las suposiciones de que la precesión libre ocurra en un campo magnético homogéneo y que el campo polarizador sea removido instantáneamente. Ambas suposiciones deben ser modificadas en un magnetómetro práctico, y el grado de modificación que pueda ser tolerado y que todavía produzca un sistema con la sensitividad requerida, es como sigue:

El valor de las constantes 8 y  $T$ , que puede ser obtenido en materiales prácticos es importante. En los isotopos naturales es una verdadera casualidad que una de las relaciones giromagnéticas nucleares más favorables sea la del protón, esto es, el núcleo de hidrógeno que se encuentra presente en tan gran variedad de compuestos disponibles. El compuesto ideal debería tener la mayor susceptibilidad nuclear posible,  $X$ , por unidad de volumen combinada con un tiempo de relajación  $T$  favorable. Puesto que  $X$  será proporcional a la densidad del átomo de hidrógeno, uno de los primeros compuestos abundantes en hidrógeno, que viene a la mente, es sencillamente, el agua. Sin embargo, dependiendo de la pureza de los compuestos o de su estado físico, el tiempo de relajación  $T$  puede variar burdamente de milisegundos a muchos segundos, y debe tenerse cuidado en ajustar  $T$  para satisfacer los requerimientos de un magnetómetro en particular.  $T$  en realidad está compuesto de  $T_1$ , el tiempo térmico de relajación (o la constante de tiempo para establecer el equilibrio en el campo polarizador) y  $T_2$  el tiempo de relajación transversal (o la constante de tiempo para el decaimiento de la libre precesión), y la única razón por la cual no pueden ser los mismos se ilustra con este ejemplo: Si partimos con una magnetización inicial  $M_i$  y si el campo magnético terrestre no es homogéneo sobre toda la muestra, entonces, a medida que el núcleo precesiona, los varios grupos de núcleos dentro del volumen de la muestra precesarán a diferentes frecuencias y perderán su coherencia de fase, con el resultado de que la amplitud total de precesión libre parecerá que decae más rápidamente de lo que ocurriría en un campo terrestre homogéneo. Uno mediría entonces una constante de tiempo más corto para el decaimiento de la precesión que para el establecimiento de la polarización, ya que los últimos efectos no dependen del valor del campo y no son afectados por la inhomogeneidad del campo magnético. Aunque pueden existir otras razones para que los tiempos de relajación no sean iguales, resulta que para muestras de interés en el magnetómetro, los tiempos de relajación son casi los mismos si el campo terrestre es homogéneo. Suponiendo que podamos seleccionar un valor óptimo para  $T_1$ , la susceptibilidad nuclear para los protones en el agua será:

$$X_0 = \frac{N (8 h)^2}{kt} \cdot \frac{j(j+1)}{3} \quad (5)$$

$$X_0 = 3.3 \times 10^{-10} \text{ cgs} \quad a \quad T = 293^\circ k$$

$$h = \frac{\text{Const. de Planck}}{2 \pi}$$

$$k = \text{Const. de Boltzmann} = 1.34 \times 10^{-16} \text{ ergs}/^{\circ}\text{C}$$

$$T = \text{Temperatura absoluta}$$

donde  $j$  es el giro nuclear (spin) y  $N$  es el número de giros por centímetro cúbico.

El campo polarizador, si es mantenido por un período de tiempo largo comparado con  $T_1$  dará un momento dipolar macroscópico por unidad de volumen de

$$M_0 = X_0 H_p \quad (6)$$

donde  $H_p$  es el campo magnético polarizador aplicado. La remoción instantánea de  $H_p$  encuentra la magnetización nuclear macroscópica a algún ángulo con respecto al débil campo residual  $H_e$  con una velocidad angular

$$\omega = 8 H_e \quad (7)$$

Cuando la misma bobina es usada para polarización y recepción,  $H_p = I H_r$ , donde  $I$  es la corriente polarizadora. El voltaje inducido es entonces

$$V = I \frac{X_0}{c} \omega (\text{sent } \omega t) \int H_r^2 \text{ sen}^2 \Theta \, dv \quad (8)$$

donde  $\Theta$  es el ángulo entre el campo terrestre y el campo polarizador. Aprovechando que la inductancia de la bobina, en unidades electromagnéticos, es

$$L = \frac{1}{4 \pi} \int H_r^2 \, dv$$

y definiendo un factor de llenado por

$$\eta = \frac{\int_{\text{muestra}} H_r^2 \sin^2 \Theta \, dv}{\int H_r^2 \, dv}$$

el voltaje máximo será

$$V_0 = \frac{4 \pi X_0 \omega}{c} L I n$$

En esta expresión  $V$  está en statvolts,  $I$  en abamperes, y  $L$  en unidades electromagnéticas. Cuando se usan unidades prácticas, la  $c$  del denominador desaparece. A la temperatura de 239° K, este voltaje es

$$V_0 = 5.67 \times 10^{-8} L I \eta \left( \frac{f}{2180} \right) \quad (9)$$

donde:

$V_0$  es el voltaje máximo observado.

$L$  es la inductancia de la bobina en millihenries.

$I$  es la corriente polarizadora en amperes.

$\eta$  es el factor de llenado de la bobina.

$f$  es la frecuencia de la señal de precesión en c.p.s.

Los valores para  $\eta$  siempre serán menores que 1, y están usualmente entre 0.3 y 0.6. Ya que  $V_0$  es la señal inicial disponible al principio de la libre

precesión, deberá decaer como ocurre con  $e^{-t/T_2}$ . El problema se reduce entonces a medir con precisión la frecuencia de la señal de libre precesión en un tiempo del orden de un segundo después de quitar el campo polarizador.

La precisión absoluta inherente puede ser estimada considerando el ancho de la línea equivalente al decaimiento exponencial observado. Bloch ha mostrado que la mitad del ancho  $\Delta H$  en gauss es dado por

$$\Delta H = \frac{1}{8 T_2} \quad (10)$$

ya que  $\Delta \omega = 8 H$ , esto se reduce a

$$\Delta \omega = \frac{1}{T_2}$$

la cual es la misma relación que obtenemos por la transformación de Fourier de la señal que consiste de una onda senoidal exponencialmente amortiguada,

$$e^{-\frac{t}{T_2}} \sin \omega t$$

Una estimación de la precisión esperada puede hacerse seleccionando valores prácticos para las constantes de la ecuación (9), con tal que uno postule una relación señal-ruido promedio dada para el sistema. Como ejemplo, elijamos una resolución determinada para el magnetómetro de  $= 10^{-6}$  gauss (0.1 gamma) en un campo de 0.5 gauss (50,000 gammas), que es burdamente el de la tierra. Entonces debemos medir la frecuencia de precesión del protón (4257 ciclos por gauss) de 2128.5 c.p.s. con una precisión de  $\pm 0.004$  ciclos. La relación señal-ruido del voltaje requerido por un sistema medidor de frecuencia es:

$$\left( \frac{S}{R} \right)_{\text{rms}} = \frac{\frac{f}{\Delta f}}{2 \pi n} \quad (11)$$

cuando  $n$  es el número total de ciclos usados para obtener una medida de la frecuencia. Midiendo durante un segundo, la relación señal-ruido resulta ser 37:1 ó 31.3 db, un valor bastante razonable. Note que esta es la señal-ruido promedio que prevalece durante el decaimiento de la señal de libre precesión, lo que significa que la relación señal-ruido será varias veces ésta, o cerca de 40 a 50 db. Una estimación de la relación señal-ruido usando estos parámetros de la bobina es como sigue:

$$L = 15 \text{ millihenries}$$

$$\eta = 0.40$$

$$I = 6 \text{ amperes}$$

$$Q = 30 \text{ (a la frecuencia } f \text{)}$$

$$R = 8 \text{ ohms}$$

$$f = 2128 \text{ ciclos por segundo.}$$

De la ecuación (9)

$$V_0 = 2 \times 10^{-6} \text{ volts.}$$

Entonces la relación señal-ruido será:

$$\frac{S}{N} = \frac{V_0}{(4 k T R \Delta f)^{1/2}} = 238 \quad (12)$$

Este resultado tiende a ser optimista, ya que no se ha tomado en cuenta la cifra de ruido del amplificador. No obstante, con un amplificador cuida-

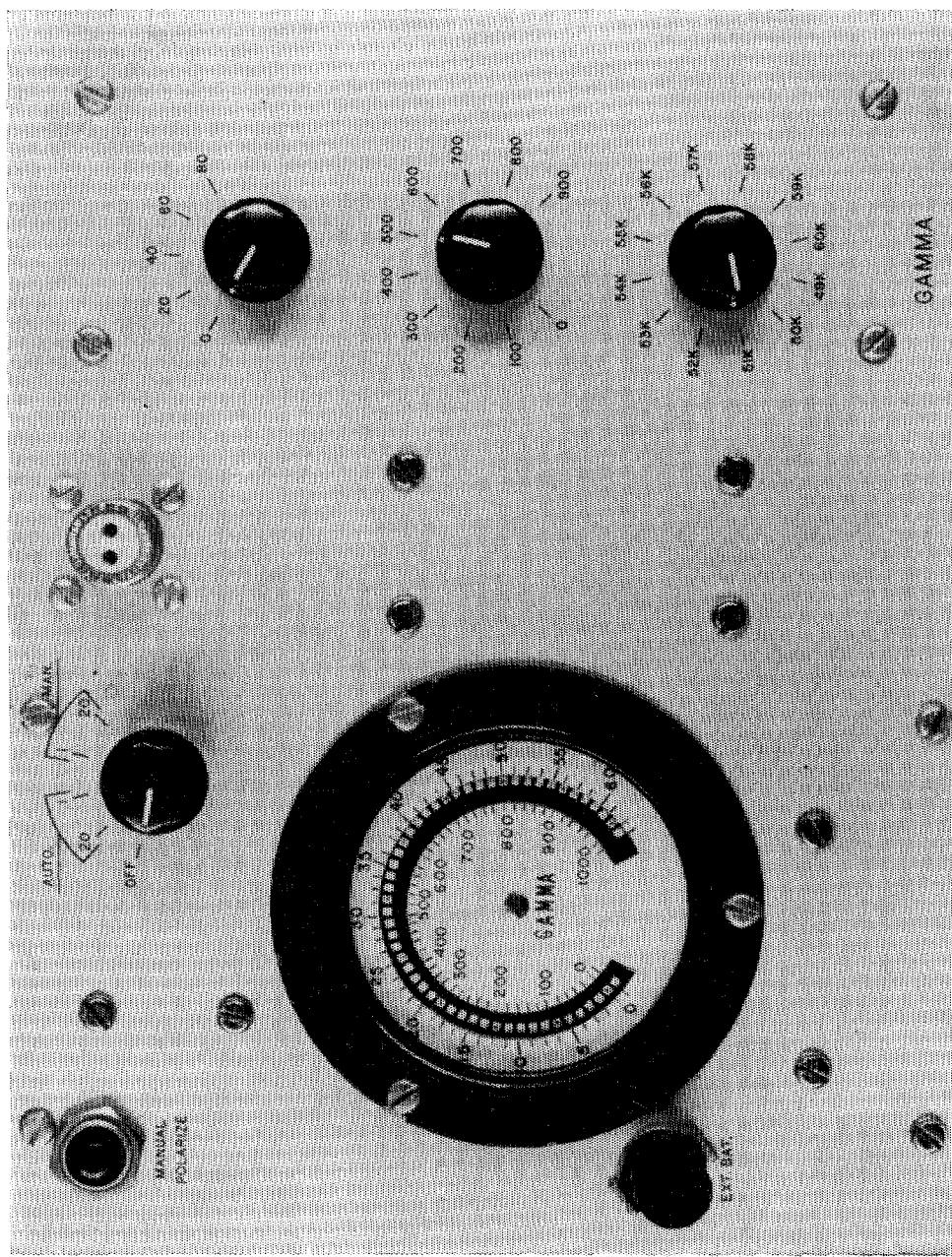


FIGURA 2

dosamente construído y un acoplamiento apropiado de la bobina de la señal de libre precesión a la entrada del mismo, esta cifra generalmente será de 3 a 5 db, lo que no afectará apreciablemente el resultado obtenido en la ecuación (12).

#### IV.—*DISEÑO DE UN MAGNETOMETRO PORTATIL*

Los instrumentos portátiles resultan de dos factores determinantes: entre la capacidad de la batería disponible y la resolución requerida. Para la mayor parte de los reconocimientos de débiles campos, una sensibilidad de  $10^{-4}$  gauss ó 10 gammas se considera adecuada, pero para permitir una mayor versatilidad a este respecto, el instrumento prototípico fue diseñado con dos sensibilidades de lectura:  $\pm 1.25$  gammas y  $\pm 10$  gammas.

El diseño de un elemento sensible compatible con estas sensitividades puede ser derivado del criterio discutido en la Sección III. La preocupación al diseñar el prototípico era llegar a un término medio apropiado entre la modesta capacidad polarizadora disponible en un instrumento operado por baterías y la relación señal-ruido requerida de un elemento sensible compacto y ligero. Una considerable experimentación con diferentes bobinas y arreglos de muestras no mostró mejoría apreciable sobre la configuración simple de una bobina de alambre de cobre enrollada alrededor de una botella de polietileno de 130 c.c. de capacidad que contiene a la muestra. El conjunto de la cápsula tiene un peso de unas dos libras y se conecta por medio de un cable a la caja que contiene los aparatos electrónicos. Esta última contiene los amplificadores necesarios, las baterías y el sistema indicador, y está hecha de aluminio siendo sus dimensiones  $6 \times 7 \times 9$  pulgadas y su peso de unas 12 libras. El instrumento completo se muestra en la fotografía de la Figura 2.

La electrónica asociada con la polarización nuclear y la medición de la frecuencia de precesión son básica y sorprendentemente simples, y se ilustran en el diagrama esquemático de la Figura 3. Sin embargo, la complejidad de los detalles de circuitos contenidos dentro de estos esquemas básicos aumenta rápidamente cuando uno especifica características tales como un amplio rango dinámico, programación automática del ciclo y lecturas directas de la intensidad del campo magnético. Haciendo a un lado estas complicaciones, consideraremos primeros las funciones de los componentes y la secuencia de los eventos que toman lugar con respecto a este diagrama simplificado de bloques.

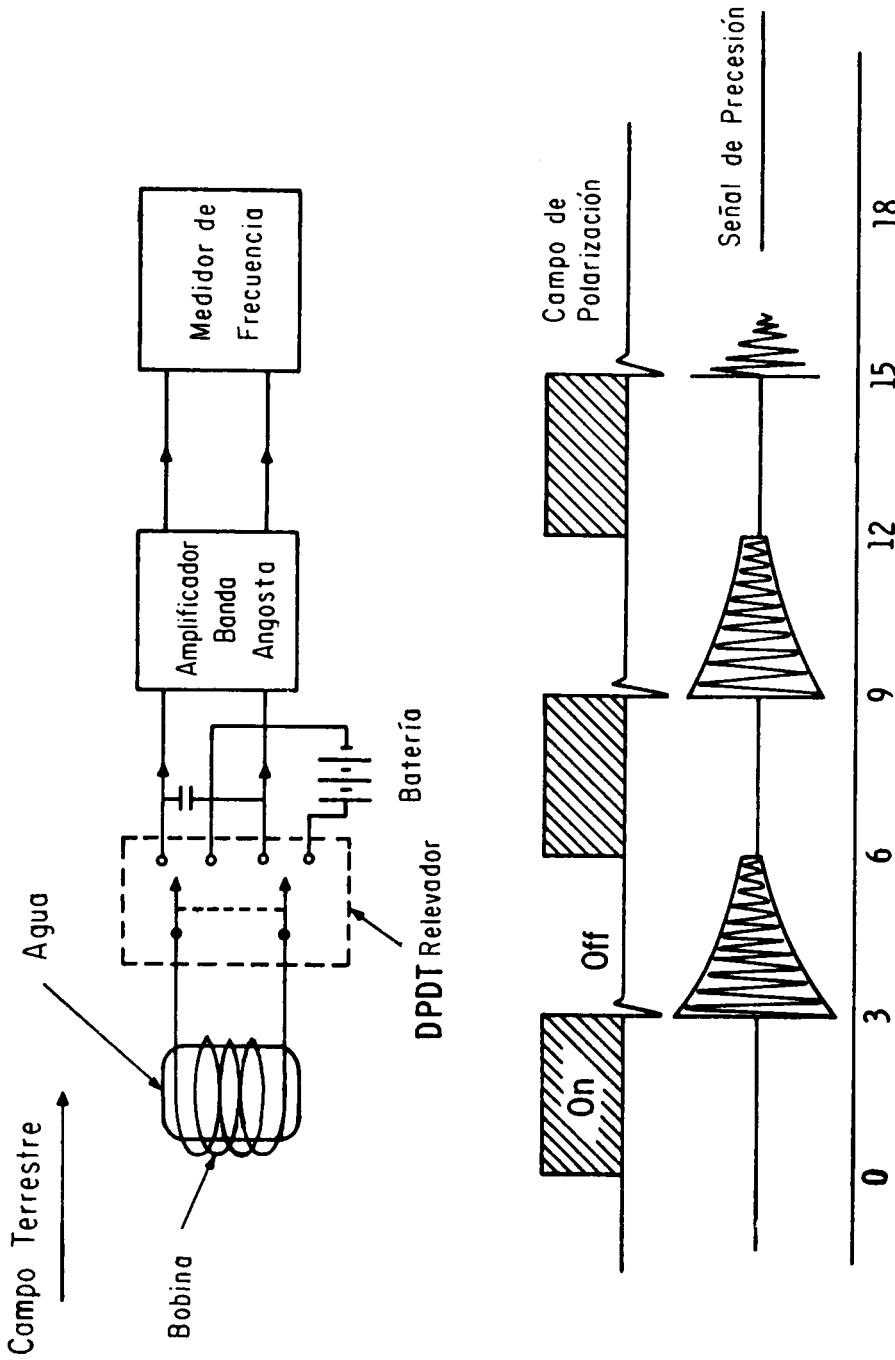
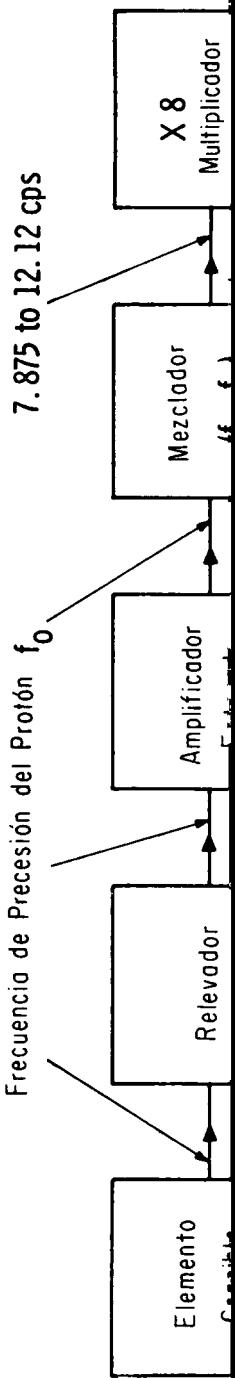


FIGURA 3

La muestra de protones y la bobina combinada poralizada y recolectora de señales se muestran orientadas normalmente al campo terrestre en la Figura 3. Para polarizar la muestra, el interruptor de doble polo y doble tiro se conecta a la batería por un período de tiempo correspondiente al  $T_1$  de la muestra, o aproximadamente 3 segundos. No hay ventaja en polarizar por un tiempo mayor que éste, y por otra parte la conservación de la vida de la batería es una consideración importante. El interruptor se conecta a continuación al amplificador de la señal. Durante el corto intervalo que transcurre entre la posición del interruptor en polarización y la de señal, se disipa la energía almacenada del campo magnético polarizador y queda muy poca de la fuerza electromotriz transitoria en el momento en que se hace la conexión de la señal. Mientras tanto, el núcleo polarizado ha empezado inmediatamente a precesionar alrededor del vector del campo magnético terrestre y ha inducido una pequeña corriente electromotriz alterna en la bobina recolectora. Durante el período en el cual se ha hecho la conexión de la señal, la bobina queda conectada a un condensador que sintoniza el sistema a una resonancia en paralelo centrada a la frecuencia de precesión nuclear. Esto amplificará la fuerza electromotriz de la señal original debido a la "Q" del circuito sintonizado y mejorará la relación señal-ruido a la entrada del amplificador de banda estrecha. Los niveles de las señales nunca son mayores de unos cuantos microvolts en el mejor de los casos, así que los amplificadores sintonizados diseñados cuidadosamente para ruido bajo son indispensables si la medida de la frecuencia de precesión tiene que obtenerse con la exactitud requerida. Habiéndose especificado una sensitividad mínima de  $\pm 10$  gammas, el criterio de diseño de la Sección III indica que debemos medir una frecuencia de 2129 ciclos con una exactitud de  $\pm 0.4257$  ciclos en un campo de 50,000 gammas. Tal exactitud impone requisitos estrictos al sistema de medida de la frecuencia del tipo analógico si es que va a ser de lecturas directas del valor absoluto de la intensidad de campo magnético. De hecho, un sistema de medición de frecuencia sencillo y compacto capaz de satisfacer esta especificación amerita la mayor parte de los detalles de ingeniería que se discutirán.

El diagrama de bloques de la Figura 4 es un ejemplo de la disposición específica del circuito usado en nuestro instrumento, pero el diseñador puede variar el rango dinámico y la resolución a fin de satisfacer sus propias necesidades. Por esta razón, hemos elegido mostrar sólo los detalles del elemento sensible y del receptor debido a su naturaleza más crítica (Figura 5).

El componente individual más importante del sistema de medida de la frecuencia es el medidor sintonizado de lengüetas. Este instrumento, fácil de conseguir en el comercio, accidentalmente combina ciertas características muy



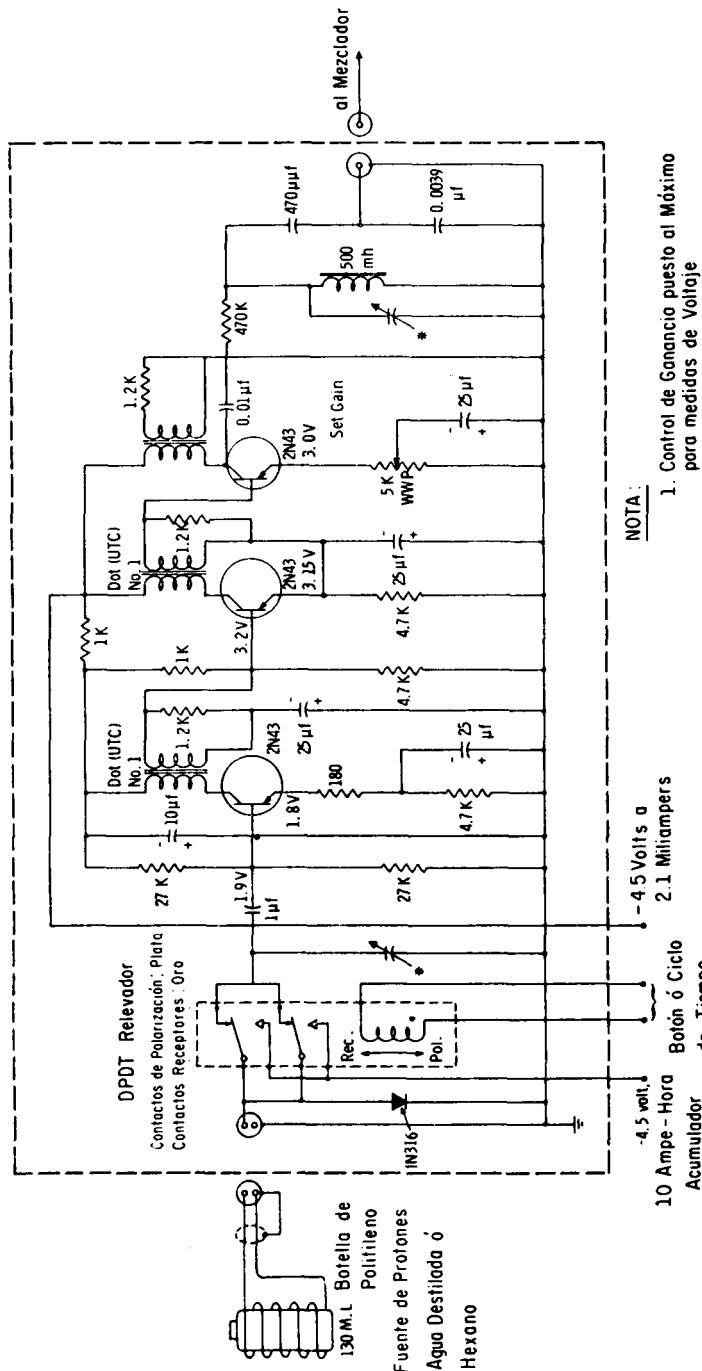


FIGURA 5

apropiadas para incorporarlo a un instrumento portátil. Requiere poca potencia para accionarlo, las lengüetas resonantes tienen "Q" extremadamente alta, y las lengüetas excitadas pueden ser observadas directamente en una escala calibrada. El medidor empleado (\*) tiene un total de 53 lengüetas que cubren un rango de frecuencia de 78.75 ciclos a 121.25 ciclos, con un incremento de frecuencia de 0.85 ciclos por lengüeta. El método para obtener la frecuencia impulsora correcta a partir de la señal de precesión libre nuclear se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 4. La señal de precesión libre amplificada es heterodinada con un oscilador local para producir una baja frecuencia que queda dentro del rango del medidor de lengüetas. De esta manera el pequeño cambio absoluto de la frecuencia de precesión dá lugar a un considerable cambio de porcentaje en la frecuencia de detección. Por ejemplo si nuestro campo postulado de 50,000 gammas cambia sólo 20 gammas, hay un cambio en la frecuencia de precesión de 0.85 ciclos, o sea el equivalente al incremento en una lengüeta. Por lo tanto las 53 lengüetas disponibles cubren un rango total de 1040 gammas en la baja sensibilidad. Si se dota el instrumento con un selector de rangos, con incrementos de 1,000 gammas, las 40 gammas extras permiten un pequeño traslape entre rangos. El instrumento fue diseñado para tener un rango dinámico total de 49,000 a 61,000 gammas, con la cual se cubren los valores nominales de la intensidad magnética encontrada a través de los Estados Unidos y gran parte de Canadá. (Nota del Traductor.—Los valores de la intensidad magnética en el mundo varían de 22,000 a 70,000 gammas aproximadamente encontrándose en la República Mexicana valores que varían entre 43,000 y 50,000 gammas. Los nuevos magnetómetros cubren rangos entre 19,000 y 81,000 gammas.)

La operación a sensibilidad alta se obtiene simplemente multiplicando la frecuencia de pulsación por un factor de 8. La sensitividad se incrementa por este mismo factor y el rango del medidor se reduce correspondientemente a una lectura de 125 gammas en la escala completa.

La frecuencia multiplicada de la señal se reduce heterodinándola con una frecuencia de oscilador fijo a fin de poder emplear el mismo medidor de frecuencia. El instrumento está también dotado de un selector de rangos adicionales el cual cambiará en pasos de 100 gammas para que no quedarán "huecos" en la escala cubierta por el instrumento.

Para una presentación de rango amplio en el medidor de frecuencia es necesario mantener la frecuencia del oscilador local dentro de los límites

---

(\*) Proporcionado por Hermann H. Sticht Co.

entre 78.75 y 121.25 ciclos por abajo de la frecuencia de la señal. Esto se logra variando la frecuencia del oscilador con pasos de 42.57 ciclos (1,000 gammas) a medida que varía la intensidad magnética del campo ambiente.

Tanto la sintonización del elemento sensible como la de la banda estrecha en el receptor se conectan simultáneamente con el oscilador local. Se usa un interruptor acoplado para el ajuste del rango amplio y el ancho de banda de los circuitos de filtro de la señal pueden hacerse tan estrechos como 45 ciclos, ya que un rango dinámico de 1,000 gammas es todo lo que se requiere.

El interruptor de rango fino (100 gammas por intervalo) está dispuesto para cambiar solamente la frecuencia del oscilador local y no resintonizar el filtro de la señal. Esto puede conseguirse conectando condensadores que resintonicen la frecuencia del oscilador local en pasos de 4.257 ciclos. A medida que se incrementa el interruptor de rango fino en pasos de 100 gammas, puede verse que el punto al cual las lengüetas vibran en el medidor disminuye en intervalos de 100 gammas. El valor correcto de la intensidad de campo magnético se obtiene siempre por lo tanto haciendo la suma de las lecturas en el interruptor de rango amplio en el interruptor de rango fino y en la escala del medidor de frecuencia.

La Sección I contiene el principio de que la frecuencia de precesión libre está basada en una constante natural inmutable, la cual para todos los fines prácticos está libre de desviaciones. Es importante notar sin embargo, que hemos introducido una fuente potencial de desviación en el sistema por medio del oscilador local. Una alta estabilidad del oscilador local es necesaria, porque cualquier desviación en la frecuencia del oscilador aparece en el medidor como un cambio aparente en la frecuencia de la señal de precesión. Se pueden construir osciladores con estabilidad bien ajustada dentro de las especificaciones usando control de cristal. En este instrumento se empleó, sin embargo, un oscilador LC compensado por temperatura. La estabilidad de la frecuencia a corto tiempo del oscilador fue más que adecuada y se hicieron correcciones periódicamente, por desviaciones de frecuencia a tiempos mayores usando un oscilador externo de calibración controlado por cristal o mediante un diapasón magnetizado.

Para incrementar su versatilidad, se tomaron providencias para que el magnetómetro fuese de operación manual como automática. La operación manual se consigue apretando el botón de polarización manual por un período aproximado de 3 segundos y soltando entonces el botón para hacer la lectura en el medidor. Este método de polarización da por resultado un consumo mínimo de la energía de la batería, cosa importante cuando se requiere una ope-

ración extensa. Con el interruptor funcionando en la posición de automático, se conecta un programador a un relevador polarizante. En estas condiciones una indicación de la intensidad magnética se presenta automáticamente a intervalos consecutivos de 6 segundos. Esta característica permitirá un rápido reconocimiento de un área para determinar la extensión y forma general de una anolamía en el campo magnético ambiente.

## V.—OPERACION

Usando nuestro criterio de diseño, la versión portátil del magnetómetro de precesión nuclear libre se ha encontrado de considerable utilidad para exploraciones magnéticas superficiales y de reconocimiento. Lo que sigue es un ejemplo típico de los resultados obtenidos en un levantamiento efectuado en una región mineralizada previamente delineada.

La técnica de operación difiere considerablemente de la usada con la balanza tipo Schmidt. El operador deberá estar magnéticamente "limpio" como es costumbre en estos casos, pero este requisito no es tan estricto en este instrumento, ya que el elemento sensible puede ser alejado alguna distancia de la posición del aparato de lectura. Se han encontrado preferible, de hecho, colocar el elemento sensible sobre una barra ligera tan alta como pueda ser manejada convenientemente para aprovechar la ventaja del efecto generalizador sobre variaciones magnéticas superficiales fuertemente localizadas, siendo suficientemente satisfactorias las alturas de 1.80 a 3.00 m. Para un levantamiento en forma de cuadrícula, el operador simplemente coloca el elemento sensible sobre la barra, presiona el botón polarizador durante unos 3 segundos, lo suelta, y hace la lectura en el medidor de frecuencia. Con tal de que se conecte el rango correcto de campo, el medidor nos indicará directamente el campo absoluto en gammas con una precisión de más o menos 10 gammas. En regiones degradientes fuertes o complejos, puede ser necesario cambiar el rango para obtener lecturas dentro de la escala del medidor. Generalmente el signo del gradiente del campo puede ser predicho de los valores de las estaciones previas, y no habrá ambigüedad acerca de cuál rango debe ser elegido. En casos raros cuando no sea así, un cambio rápido a través de varios rangos después del ciclo polarizador de tres segundos permitirá usualmente encontrar el rango apropiado. El tiempo empleado en leer una estación en esta forma es de cerca de seis segundos. En campo abierto, la información puede ser obtenida tan rápidamente como el operador se pueda trasladar, si inicia el ciclo polarizador algunos metros antes de llegar al lugar de la siguiente estación, y

haciendo la lectura en el instante en que el elemento sensible se encuentra en la posición apropiada. En observaciones de este tipo con una sola persona, es evidente que la limitación en un levantamiento rápido está en el tiempo necesario para anotar la información. Con una brigada de dos hombres, uno haciendo la lectura y el otro anotándola, es fácil observar un promedio de más de 60 estaciones, con separación de 15 metros, por hora, con muy poca fatiga del operador o entrenamiento preliminar.

El método para obtener y reducir la información del magnetómetro de precesión libre del protón se simplifica considerablemente y requiere menos tiempo que el necesario para una balanza del tipo de Schmidt. Se puede omitir el promedio de lecturas a  $180^\circ$ , por ejemplo, y las complicaciones normales que se tienen con el cambio de escalas. Como ilustración, se muestra a continuación una copia de una hoja de datos, con los cuales fue construído el perfil de la Figura 6.

No. de Estación	Intensidad Total en gamas	Hora
193	51180	10:15
194	51220	
195	51080	
196	52220	
197	52800	
198	53640	
199	53760	
200	54000	
201	54340	
202	54680	
203	55980	
204	57440	
205	56720	
206	55240	
207	53780	
208	52620	10:16

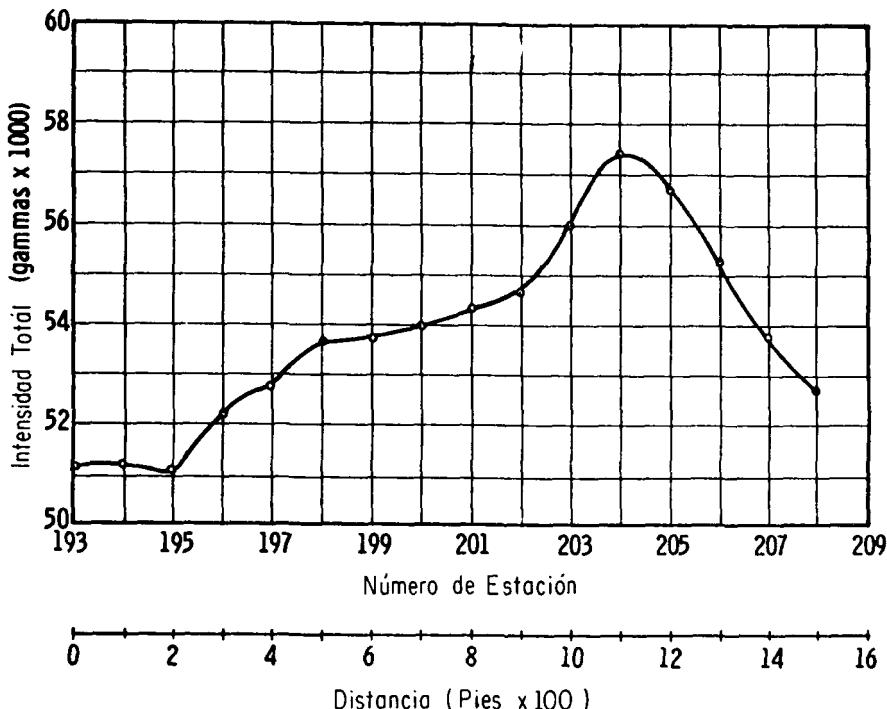


FIGURA 6

Teniendo debidamente en cuenta la variación diurna normal del campo geomagnético, encontramos que los resultados de un día a otro en una misma estación coinciden dentro de la resolución del instrumento. La batería de 10 amperes hora suministró suficiente energía para la operación de un día de trabajo de 8 horas, y fue posible recargarla durante la noche. La deriva instrumental fue checada de tiempo en tiempo utilizando un oscilador de cuarzo que simulaba la señal del protón, y las ligeras variaciones ocurridas se correlacionaban con los cambios de temperatura ambiente, como era de esperarse.

## CONCLUSIONES

El magnetómetro portátil de precesión libre descrito, fue empleado para explorar anomalías del campo geomagnético superficial. Encontramos que

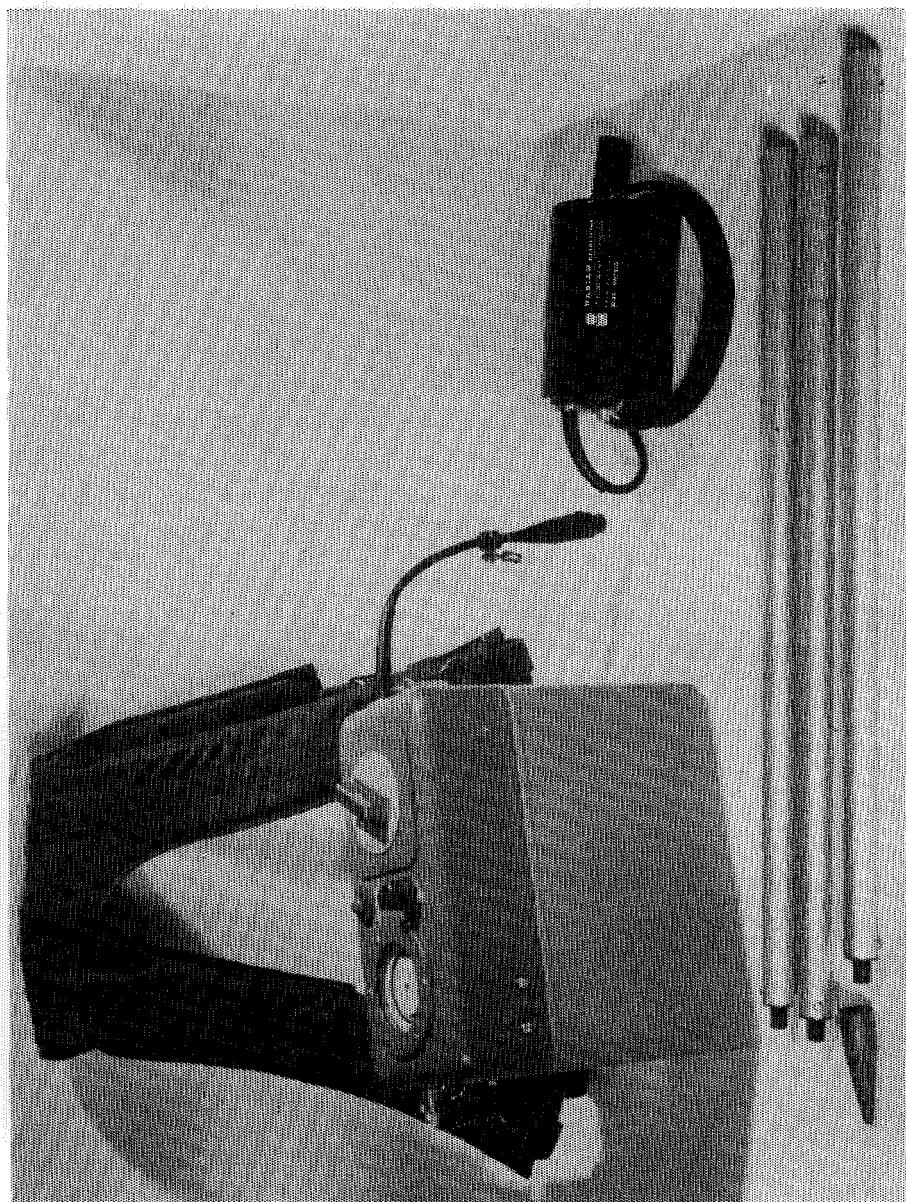


FIGURA 7

el instrumento más apropiado para reconocimientos muy rápidos que los con aparatos sensitivos a su orientación, y que podía ser operado fácilmente a bordo de vehículos en movimiento. El instrumento no funciona bien en regiones con gradientes fuertes de campo magnético, o en la cercanía de campos intensos producidos por corrientes eléctricas de 60 ciclos, restringiéndose su uso al campo libre o edificios magnéticamente limpios. La elevada precisión absoluta potencial es útil para correlacionar información magnética de diferentes localidades geográficas así como para la calibración de otros sistemas.

## AGRADECIMIENTOS

Estamos agradecidos a M. E. Packard y A. L. Bloom de este laboratorio por su ayuda y estímulo durante el desarrollo del instrumento prototípico. También deseamos dar gracias a Parker Gay de Utah Construction Co., y a Robert J. Searls de Newmont Mining Corp. por su valiosa ayuda en las mediciones del campo magnético.

## NOTA ACLARATORIA

El instrumento portátil descrito en este artículo es el instrumento prototípico del cual se derivó el actual magnetómetro nuclear comercial portátil manufacturado por Varian Associates, el cual es el modelo M-49A. Los cambios principales en el modelo comercial son el uso de un oscilador local controlado por cristal, la eliminación de la escala más fina y un completo reacomodo de las componentes en su caja.

# PRINCIPIOS QUE SE UTILIZAN EN EL MAGNETOMETRO DE PRECESION LIBRE NUCLEAR

Por el *Ing. Enrique del Valle T.* \*

## R E S U M E N

El nuevo magnetómetro de precesión nuclear, presenta características de diseño y operación muy ventajosas con respecto a los magnetómetros convencionales.

En este artículo se muestran en una forma condensada, los principios atómicos y nucleares de los cuales se derivan las ecuaciones que definen la "Resonancia Magnética Nuclear" y el "Tiempo de Relajamiento" que son fundamentales para poder determinar la intensidad del campo magnético terrestre a partir de la medida de la frecuencia de precesión del núcleo.

Los métodos magnéticos de exploración encaminados a determinar la presencia en el subsuelo de cuerpos con propiedades magnéticas especiales o de grandes cuerpos masivos, por medio de mediciones de las anomalías del campo magnético terrestre, son sin duda los más antiguos y sus principios básicos prácticamente no han cambiado. Las variaciones en las técnicas de operación se deben principalmente al perfeccionamiento de los instrumentos que miden la variación del campo magnético terrestre persistiendo en ellos los mismos principios generales. La interpretación siempre ha presentado indeterminación en sus resultados, debido fundamentalmente a que todos los estudios

---

\* Gerencia de Exploración, Petróleos Mexicanos.

se han encaminado a la medida de los efectos producidos por cuerpos de propiedades magnéticas en conjunto.

El desenvolvimiento de la Física Nuclear y la comprobación experimental de las leyes de la relatividad de Einstein y la teoría del Quantum de Planck, han mostrado nuevos aspectos que son útiles para explicar el magnetismo en los cuerpos, así como características que permiten medirlo en ellos, estableciendo su origen y las leyes que lo rigen.

El objeto de este trabajo, es mostrar la diferencia tan marcada que existe entre la forma de atacar los problemas por medio de los métodos magnéticos de exploración en uso, utilizando los instrumentos tradicionales, tales como el ainclinómetro, las balanzas magnéticas y los magnetómetros de torsión, en los cuales en forma óptica o mecánica se hacen mediciones que son proporcionales a los efectos magnéticos, y los principios que se aprovechan para el diseño de los nuevos magnetómetros de precesión nuclear.

Los instrumentos que hemos mencionado, se han diseñado para medir las variaciones del campo magnético terrestre. Todos esencialmente constan de un elemento magnético, tales como un pequeño imán, que al colocarlo dentro del campo magnético terrestre, se ven sujetos a fuerzas proporcionales a sus momentos magnéticos polares y que tienen un valor definido por la ecuación:

$$F = \frac{PP'}{\mu r^2}$$

En algunos instrumentos, solo se mide una de las componentes del campo magnético terrestre. Esta medición del campo magnético terrestre, se hace por comparación con el momento magnético polar del elemento del instrumento, determinándose por el giro o desplazamiento que produce en el elemento, la fuerza de repulsión o tracción de Gauss.

La forma de observar este desplazamiento o giro, es la que nos define generalmente de qué tipo de instrumento se trata.

En el inclinómetro la aguja magnética sufre desviaciones verticales y ópticamente medimos el ángulo de giro vertical que será proporcional al campo magnético terrestre.

En las balanzas magnéticas por efecto de la componente vertical u horizontal de la atracción magnética, según sea el caso, el elemento magnético sufre desviaciones girando un ángulo que es proporcional al campo magnético terrestre, la manera de medir este ángulo de giro se hace por medio de espejos que amplifican su desviación.

Los magnetómetros de torsión, consisten de un elemento magnético unido a un hilo de torsión, al actuar la atracción magnética terrestre sobre el elemento, éste gira produciendo una torsión en el hilo, el ángulo de giro que se necesita mover el hilo de torsión para ponerlo en equilibrio, será proporcional al campo magnético terrestre y a la constante de torsión del hilo.

Como vemos en cualquiera de estos instrumentos se emplean métodos mecánicos para medir los efectos que produce el campo magnético terrestre sobre un elemento con propiedades magnéticas macroscópicas conocidas sin preocuparnos cuál es el origen o condiciones de su magnetismo.

El magnetómetro de precesión libre nuclear, nos muestra nuevos conceptos que podemos interpretarlos ya no como efectos magnéticos, ordinarios, sino como las causas mismas del magnetismo en la materia.

Los principios que se utilizaron en el diseño del magnetómetro de precesión nuclear parecen ser simples, sin embargo, su comprensión necesita tener claros, ciertos principios de la física moderna que son diferentes de los de la mecánica clásica a la cual estamos acostumbrados.

En realidad en el magnetómetro de precesión nuclear, también se mide el movimiento de un elemento magnético, con la diferencia de que en este caso el elemento magnético es el más simple que se conoce y cuyas propiedades magnéticas no se las debe a otros elementos, sino a sí mismo. éste es el protón.

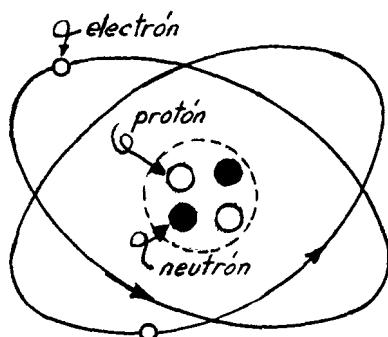
Los principios que se han utilizado para el diseño de los nuevos magnetómetros de libre precesión del protón son los conceptos de resonancia nuclear y el tiempo de relajación.

Aunque estos principios son de uso común en la física nuclear, para muchos técnicos en Exploración Geofísica no son muy familiares, por lo que hemos preparado este artículo de divulgación.

Para tener una idea clara del funcionamiento de los magnetómetros de libre precesión nuclear y de los principios que se utilizan en éllas, es conveniente hacer una revisión de los conceptos de física nuclear de los cuales se derivan.

Es bien conocido que los átomos que forman la materia, están constituidos por partículas elementales con propiedades intrínsecas invariables; el número de estas partículas elementales y su arreglo dentro de la estructura atómica definen las propiedades físico-químicas de cada substancia en particular.

En la figura No. 1 se muestran los principales elementos constitutivos del átomo.



<b>MASA EN REPOSO</b>	
Electrón	$9.107 \times 10^{-28}$ gr.
Protón	$1.672 \times 10^{-24}$ gr.
Neutrón	$1.675 \times 10^{-24}$ gr.
<b>CARGA ELECTRICA</b>	
Electrón	$-4.80 \times 10^{-10}$ ues
Protón	$+4.80 \times 10^{-10}$ ues
Neutrón	neutro

Fig. 1.—Representación esquemática del átomo.

El núcleo está formado por protones y neutrones, pequeñas partículas que se les da el nombre genérico de nucleones y están ligados entre sí debido a la fuerza de interacción de sus masas, siendo estas dos partículas las poseedoras de casi el total de la masa del átomo.

El electrón que es la partícula de masa más pequeña que se conoce, se encuentra girando alrededor del núcleo, y es poseedora de una carga eléctrica elemental. La materia en su estado normal es neutra eléctricamente, lo que presupone que las cargas eléctricas dentro del átomo tienen que estar equilibradas. En efecto la carga eléctrica negativa de los electrones está neutralizada por la carga eléctrica de los protones que es positiva y de igual valor al del electrón. Se le ha dado el nombre de protón al ion positivo del hidrógeno que es el más simple de todos los elementos.

Las cargas eléctricas del electrón y el protón hacen que éstos se estén atrayendo constantemente y el electrón se mantiene en su órbita en virtud de

la fuerza centrífuga originada por el movimiento de rotación del electrón alrededor del núcleo.

El electrón se mueve a gran velocidad describiendo órbitas alrededor del núcleo, que Bohr había considerado circulares pero que Sommerfeld ha demostrado que son elípticas y que no son perfectamente estables sino que adquieren un cierto movimiento de precesión figura No. 2.

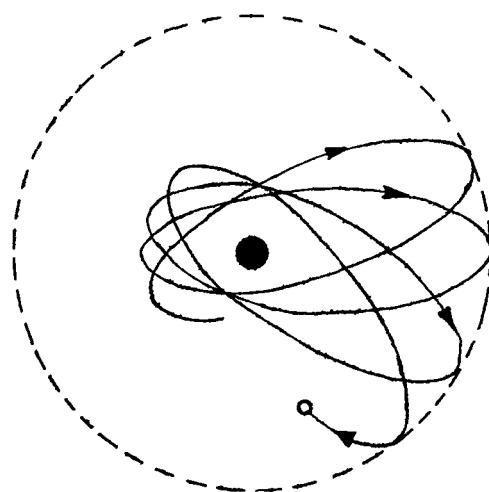


Fig. 2.—Orbitas que describen el electrón alrededor del núcleo.

La órbita que describe el electrón no puede ser cualquiera sino que se encuentra gobernada por las teorías cuánticas de Planck y Relativista de Einstein. De acuerdo con estas teorías se establece que no solo la materia está formada por partículas elementales sino que la energía está también cuantizada o sea que existe una cantidad de energía mínima y que cualquier cantidad de energía se manifiesta en múltiplos de ésta, por otra parte la masa y la energía son equivalentes siendo transformable una en la otra y cuando un cuerpo se mueve a gran velocidad o recibe energía del exterior, su masa aumenta, tomándose como límite de velocidad la de la luz.

De acuerdo con estas condiciones, el electrón se moverá en una determinada órbita que corresponda a la cantidad de energía que posea, no pudiendo cambiar de órbita mientras la energía no cambie.

El electrón al moverse en su órbita adquiere una energía que cumple con los postulados de Bohr que establecen que en magnitud el momento de la cantidad de movimiento del electrón es un múltiplo del valor de la energía del electrón y está definido por la ecuación:

$$E = - \frac{2 \pi^2 Z^2 e^4 m}{h^2 n^2}$$

donde:

$Z$  = Carga nuclear efectiva.

$e$  = Carga electrónica.

$m$  = Masa

$h$  = Constante de Planck =  $6.624 \times 10^{-27}$  erg seg.

Las órbitas posibles del electrón, son las que corresponden a cantidades enteras de energía, conociéndose estas órbitas como niveles cuánticos, siendo la de menor valor de energía la que corresponde al estado más estable del átomo, en la figura No. 3 se muestran los niveles cuánticos para el átomo del hidrógeno.

El movimiento del electrón alrededor del núcleo da lugar a un momento cinético cuyo vector representativo se encuentra localizado en un eje que pasa por el núcleo. En la figura No. 4 observamos que un cuerpo de masa que se mueve con una velocidad  $V$  alrededor de un eje O, se comporta análogamente a un elemento de masa sujeto a una fuerza que gira con una velocidad angular

$$\omega = \frac{V}{R}$$

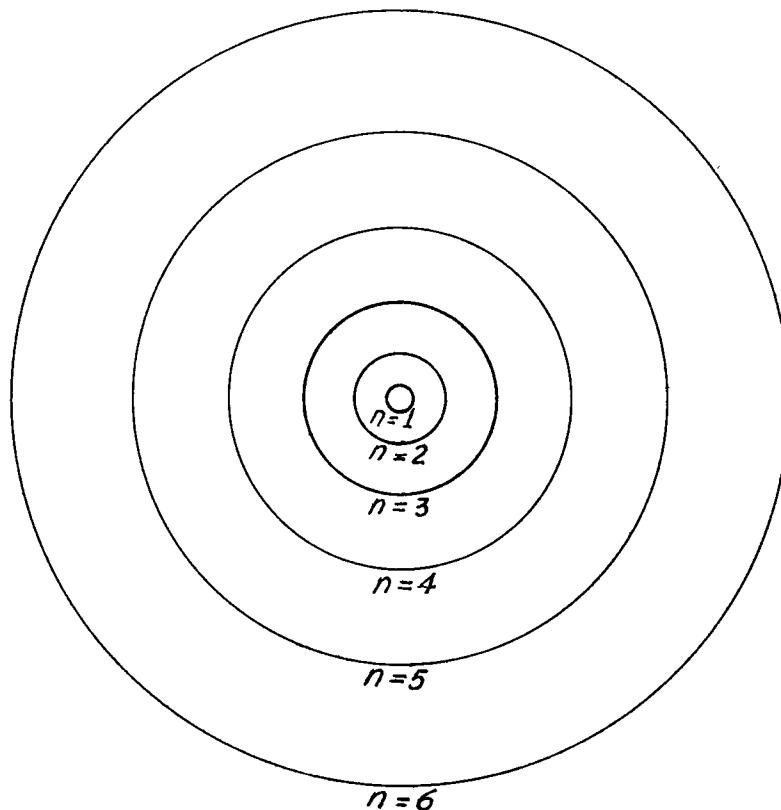


Fig. 3.—Niveles cuanticos del Hidrógeno ("Física atómica y nuclear".—Henry Samat).

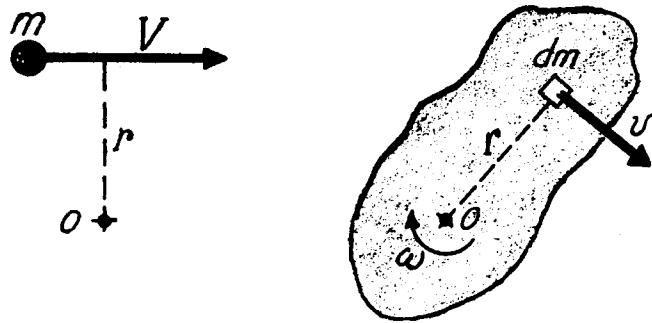


Fig. 4

El momento cinético o angular del elemento será:

$$dL = r V dm = r^2 \omega dm$$

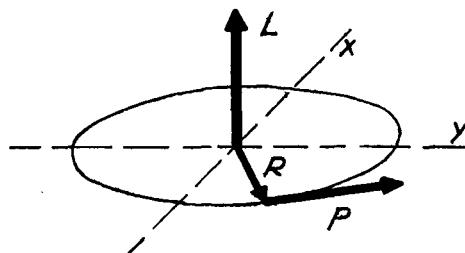
$$L = \int \omega r^2 dm = \omega \int r^2 dm = \omega I$$

$$\text{pero } I = m r^2 ; \quad L = m r^2 \omega$$

$$\text{y } V = \omega r$$

$$\therefore L = m v r$$

Lo que nos indica que el momento cinético (angular) de un cuerpo que gira alrededor de un eje es igual al momento de la cantidad de movimiento. Vectorialmente se puede representar lo anterior como se indica en la figura 5.



$$P = mV = \text{momento lineal}$$

$$R = \text{Vector de posición}$$

$$L = mVR = P \cdot R$$

Fig. 5

En el caso del electrón el momento cinético orbital, de acuerdo con la teoría cuántica, es un vector cuya componente más grande posible es un múltiplo de  $\frac{\hbar}{2\pi}$ , que se utiliza frecuentemente como unidad de momento cinético y se le dá el nombre de constante de Dirac:

$$\hbar = \frac{\hbar}{2\pi}$$

De los experimentos medicionales del momento cinético del electrón, se encontró que el momento cinético total no es igual al momento cinético orbital calculado, sino que se define por:

$$J = L + S$$

Siendo  $J$  el momento cinético total del electrón,  $L$  el momento cinético orbital y  $S$  un momento cinético que se ha demostrado que es debido a un movimiento de giro que tiene el electrón sobre su propio eje y que se conoce como el "Spin" del electrón. El momento cinético debido al spin, de acuerdo con la mecánica ondulatoria, tiene un valor

$$S = \sqrt{s(s+1)} \hbar$$

donde  $S$  es el número cuantico del spin y es igual a  $\frac{1}{2}$ , por lo que

$$S = \frac{\sqrt{3} \hbar}{2}$$

El momento cinético debido al movimiento de rotación del electrón alrededor del núcleo y el momento cinético debido al Spin se combinan dando un momento cinético resultante que se localiza en un eje que pasa por el núcleo. En la figura número 6 se muestra la combinación vectorial de los dos momentos cinéticos.

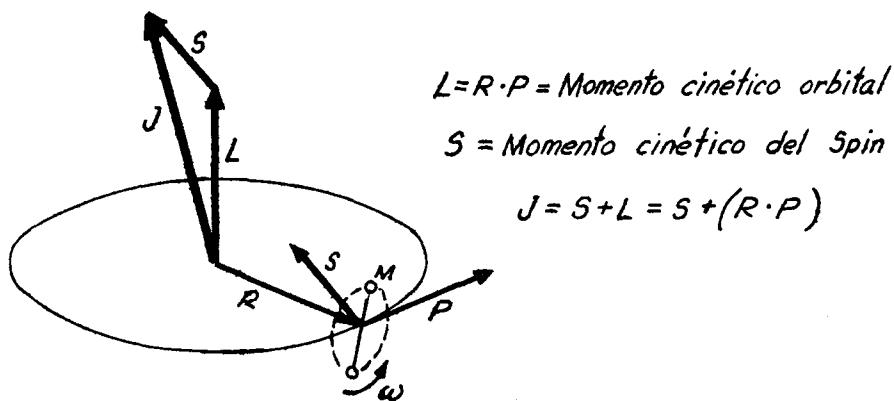


Fig. 6

El momento cinético total del electrón tiene un valor que será siempre un múltiplo impar de  $\frac{1}{2}$ .

*EFFECTOS MAGNETICOS DE LOS ELECTRONES ORBITALES*

Como el electrón no solo tiene masa, sino que también posee carga eléctrica al moverse en una órbita plana, da origen a un momento magnético.

El movimiento del electrón al moverse en su órbita que cubre un área  $A$  equivale a una corriente  $i$  que genera un momento dipolar magnético.

$$\mu = \frac{i}{c} A$$

siendo:

$i$  == Corriente equivalente.

$A$  == Área de la órbita.

$c$  == Velocidad de la luz.

pero:

$$i = \frac{e}{t} ; \quad v = \frac{2 \pi r}{t}$$

$e$  == Carga eléctrica.

$$i = \frac{e v}{2 \pi r} ; \quad A = \pi r^2$$

substituyendo

$$\mu = \frac{-e v}{2 \pi r} \cdot \frac{\pi r^2}{c} = -\frac{e v r}{2 c}$$

$$\text{pero } L = m v r = \frac{\pi h}{2 n}$$

si  $n$  es entero e igual a 1

$$v = \frac{h}{2 \pi m r}$$

$$\therefore \mu = \frac{e h}{4 \pi m c}$$

Al momento magnético del electrón, por estar involucradas la masa y la carga eléctrica elementales, se le ha considerado como la unidad de momento magnético en estructuras atómicas y se le dá el nombre "Magnetón de Bohr".

$$\mu_B = \frac{e h}{4 \pi m c} = 0.92 \times 10^{-20} \text{ erg/gauss}$$

Estas características del electrón y la presencia de un momento magnético son las que le dan sus propiedades magnéticas al átomo comportándose como un imán diminuto. Sin embargo, en condiciones normales, los electrones dentro de la estructura atómica descubren órbitas que pueden formar distintos ángulos entre sí dando lugar a que sus momentos magnéticos se cancelen. La resultante de los momentos magnéticos determinará las propiedades magnéticas del atómico indicando su valor si las substancias son diamagnéticas o paramagnéticas.

### EFFECTOS MAGNETICOS NUCLEARES

Hasta este momento sólo se ha analizado el comportamiento del electrón sin tomar en cuenta la participación de los nucleones, que si bien la magnitud de sus efectos no es grande, su importancia es tanta o mayor que la del electrón.

Del tratamiento experimental dado a la estructura completa del átomo, se ha determinado que el momento cinético total del átomo es el vector suma

del momento cinético total de los electrones y el momento cinético debido al núcleo.

$$F = I + J = I + (L + S) = \frac{h}{2 \pi}$$

donde:

$L$  = Momento cinético orbital del electrón.

$S$  = Momento cinético del spin del electrón.

$I$  = Momento cinético del spin del núcleo.

Lo anterior indica que dentro del núcleo tanto el protón como el neutrón están animados de un movimiento de giro alrededor de su propio eje dando origen a momentos cinéticos cuya suma es el momento cinético del núcleo. Puesto que la masa del protón es casi igual a la del neutrón, sus momentos son prácticamente iguales; para el protón tiene un valor:

$$S_p = \frac{1}{2} \frac{h}{2 \pi}$$

En forma análoga al comportamiento del electrón, y en virtud de su spin, en el núcleo también se genera un momento magnético que se debe exclusivamente a la carga eléctrica positiva del protón ya que el neutrón eléctricamente es neutro. Al momento magnético del protón, que lo es del núcleo, se le conoce como "Magnetón Nuclear" y tiene un valor

$$\mu_n = \frac{e h}{4 \pi m_n c} = 5.04929 \times 10^{-24} \text{ erg/gauss}$$

Como se puede observar el magnetón nuclear es 1/1837 del Magnetón de Bohr, ya que

$$\frac{\mu_n}{\mu_B} = \frac{\frac{e h}{4 \pi m_n c}}{\frac{e h}{4 \pi m_e c}} = \frac{m_e}{m_n} = \frac{1}{1837}$$

La mayor parte del momento magnético se debe al electrón, pero desde el punto de vista cualitativo, el momento magnético del electrón es menos estable que el del protón, porque depende en gran parte de su movimiento orbital que puede ser alterado con relativa facilidad por elementos externos o por los electrones de los átomos contiguos, mientras que el protón dentro del núcleo en condiciones normales permanece prácticamente inalterable, por lo tanto para las mediciones del momento magnético de los átomos se prefiere utilizar al protón que ofrece más ventajas.

Tanto los momentos magnéticos como los momentos cinéticos son originados por los movimientos de las partículas atómicas, lo que sugiere la existencia de una relación entre sí.

La relación del momento magnético al momento cinético se conoce como "relación giromagnética".

$$\frac{\text{Momento magnético}}{\text{Momento angular}} = \gamma$$

$$\gamma = \frac{\frac{e h}{4 \pi m c}}{\frac{h}{4 \pi}} = \frac{e}{m c}$$

La relación giromagnética es invariable para cada partícula y característica de cada substancia.

Conocidas las características magnéticas propias de las partículas elementales del átomo, veamos ahora como se comportan cuando se encuentran dentro de un campo magnético exterior uniforme.

El átomo en condiciones normales debe todo su momento magnético a sus spins y se ha demostrado que cuando los átomos se encuentran en un campo magnético de intensidad  $H$ , se orientan en direcciones tales que la proyección  $J = S = \frac{1}{2}$ , en la dirección del campo magnético, solo puede tener valores definidos por el número cuántico, en la figura 7 se muestra lo anterior.

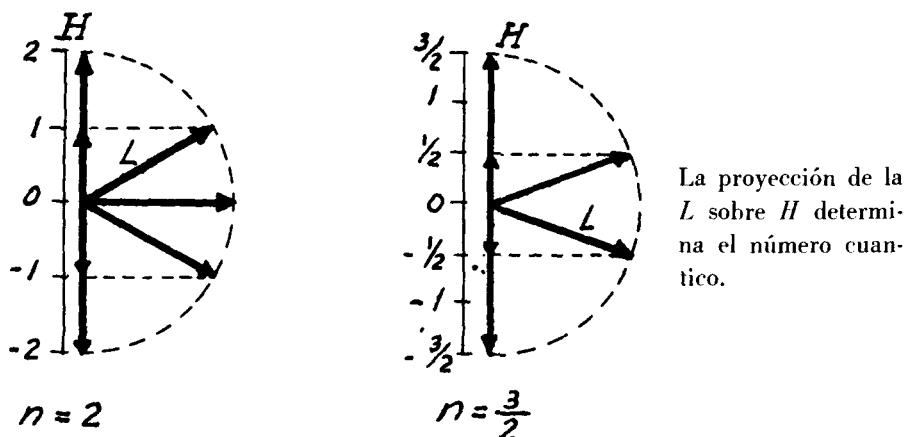


Fig. 7

Los pequeños imanes atómicos dentro de un campo magnético uniforme, experimentan pares de torsión que los orientan con respecto al campo magnético, y se encontrarán en las condiciones que se muestran en la figura 8.

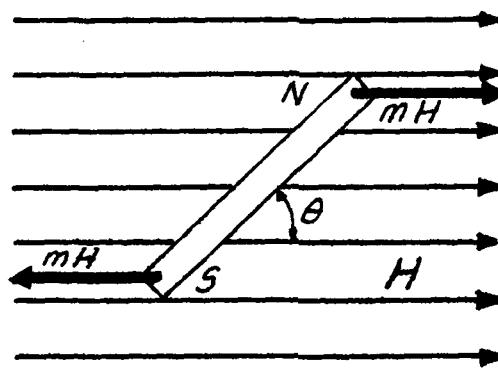


Fig. 8

Al encontrarse el imán atómico formando un ángulo  $\Theta$  con el campo magnético, se produce un par cuyo momento es:

$$M = -Hml \operatorname{sen} \Theta \quad ml = \mu$$

$$M = -H\mu \operatorname{sen} \Theta$$

si el ángulo  $\Theta$  es pequeño:

$$M = -H\mu \Theta$$

En estas condiciones las ecuaciones de movimiento se asemejan a las de un péndulo físico con  $M = -k\Theta$ , produciéndose un movimiento armónico o de rotación o de precesión que obliga al imán a oscilar alrededor de su posición de equilibrio con un período

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_o}{H\mu}}$$

A este movimiento se le llama precesión:

$$T = \frac{1}{f} \quad ; \quad \omega = 2\pi f$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{I_o}{H\mu}} \quad ; \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{\frac{I_o}{H\mu}}}$$

elevado al cuadrado

$$\omega^2 = \frac{1}{\frac{I_o}{H\mu}}$$

pero  $L = I \omega$

$$\therefore \omega = H \frac{\mu}{L} = 8 H$$

Esta ecuación establece que la frecuencia de precesión, que se conoce como frecuencia de Larmor, es proporcional a la relación giromagnética y a la intensidad del campo magnético.

Cuando la posición original del imán atómico es normal a la dirección del campo magnético, la frecuencia de precesión será máxima debido a que el ángulo de desviación es el máximo y en este caso se dice que la frecuencia de precesión es la de resonancia.

La medición de la frecuencia de precesión por el método de resonancia magnética nos permite conocer la intensidad de un campo magnético y es el que se utiliza en el magnetómetro de precesión libre nuclear.

Para que el imán atómico pase de su posición original a su orientación con momento magnético estable, se requiere un intervalo de tiempo que se llama "tiempo de relajación" que depende de las interacciones entre los momentos magnéticos nucleares y de los movimientos y configuración de los electrones, variando de una substancia a otra entre límites muy amplios, desde fracciones de segundo a varios miles de segundos. El tiempo de relajación está relacionado con la variación del momento angular.

La variación del momento angular con respecto al tiempo podemos deducirlo a partir de las condiciones en que se establece la resonancia magnética nuclear como se ve en la figura 9.

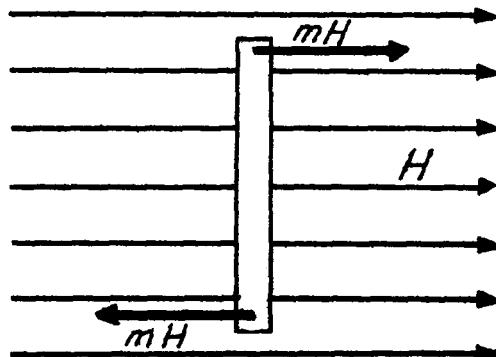


Fig. 9

$$M = mH = \mu H$$

por lo que

$$\frac{dM}{dt} = \mu H$$

$$\text{o en función de } \gamma = \frac{M}{J}$$

$$\frac{dJ}{dt} = \gamma \mu H$$

Las ecuaciones que definen los fenómenos de frecuencia de resonancia magnética nuclear y del tiempo de relajación, son utilizados en el diseño de los magnetómetros de precesión.

En estos instrumentos se coloca una muestra que contenga suficientes protones que al encontrarse en un campo magnético permitan medir su frecuencia de precesión que será proporcional a la intensidad del campo magnético.

El elemento de composición más simple que se conoce es el hidrógeno y una substancia que lo contiene en gran cantidad es el agua.

La muestra de protones se coloca dentro de un par de bobinas, una de ellas conectada a un sistema polarizador con la cual se pueda crear un campo magnético de intensidad conocida y suficientemente grande para que oriente los protones en una dirección normal al campo magnético terrestre (figura 10). Para alcanzar la posición de equilibrio transcurre un intervalo de tiempo (tiempo de relajación) que para el hidrógeno es de sólo 3 segundos; al estar en esta posición se quita súbitamente la corriente polarizadora de tal forma que los imanes atómicos se encontrarán sujetos exclusivamente al campo magnético terrestre y tratarán de orientarse en la dirección del campo magnético terrestre, generándose un movimiento de precesión que tendrá una frecuencia de resonancia proporcional a la intensidad del campo magnético. El movimiento de precesión en presencia del campo magnético genera una fuerza electromotriz, que es inducida en la segunda bobina y mediante un sistema de medición electrónica es medida la frecuencia de Larmor, para lo cual en algunos instrumentos se usan frecuencímetros.

El problema de invertir el sentido de un campo magnético súbitamente, es difícil para un sistema del spin del electrón, siendo más simple para un spin nuclear por ser más pequeña su frecuencia de precesión.

En átomos de hidrógeno y para campos polarizadores de 3,000 gauss se han determinado frecuencias de precesión de 10 000 Mc mientras que para el protón es de 12.7 megaciclos.

El tiempo necesario para hacer la medición de la frecuencia es de solo 6 segundos, lo cual permite una operación sumamente rápida. En vista de que no existen fricciones, inercias o apoyos mecánicos en los protones, no hay necesidad de orientar las muestras con el cuidado que requieren los instrumentos convencionales.

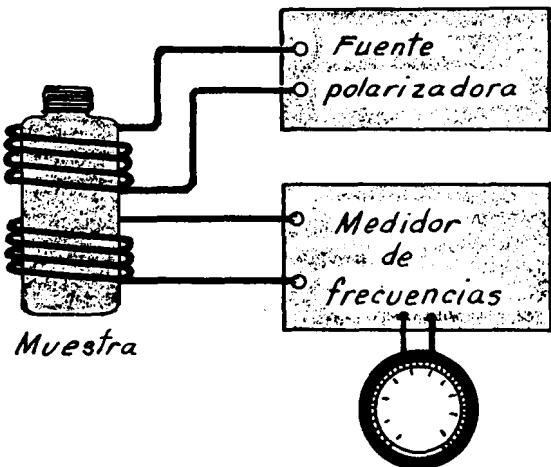


Fig. 10.—Diagrama esquemático de un magnetómetro de precesión nuclear.

La precesión que se ha alcanzado con estos instrumentos es de  $\pm 10$  gamas, probablemente todavía no se ha logrado el máximo posible y en un futuro puedan evolucionar los métodos instrumentales como ha sucedido con los demás equipos geofísicos.

Lo interesante es que se ha atacado el problema del conocimiento de las propiedades magnéticas en una forma más directa, todos los alcances del método todavía no se conocen, hasta la fecha solo ha interesado en mayor proporción a investigadores y físicos pero su introducción en el campo de la técnica ya está hecha y presenta un panorama vasto y ambicioso para su explotación, no es difícil que en los próximos años se desarrolle nuevas técnicas basadas en estos principios que hemos esbozado, y que nos permitan conocer mayores datos de los diferentes materiales que forman la corteza terrestre, así como separar los pequeños efectos debidos a rocas de baja susceptibilidad magnética, como las rocas sedimentarias, que hasta ahora no se han podido detectar por levantamientos magnéticos, y que son de tanta importancia en las exploraciones Geofísicas principalmente para la búsqueda del petróleo.

## B I B L I O G R A F I A

BLANCHARD-BURNETT.—“Introduction to Modern Physics”.—Prentice Hall-1958.

DOBRIN.—“Introduction to Geophysical Prospecting”.—McGraw Hill-Second Edition.—1960.

INGARD-KRAUSHAAR.—“Introduction to mechanics, matter and waves”.—Addison Wesley.—1960.

KAPLAN.—“Nuclear Physics”.—Addison Wesley.—1958.

KITTEL.—“Introduction to Solid State Physics”.—Wiley & Sons.—Second Edition.—1957.

MC GRAW HILL.—“Encyclopedia of Science and Technology”.—Mc Graw Hill.—1960.

PACKARD E. MARTIN.—Varian Associates “Free Nuclear Precession Magnetometer”.—Feb., 1956.

REISNICK-HALLIDAY.—“Física para estudiantes de Ciencias e Ingeniería”.—Contidental.—1961.

SEMAT.—“Física Atómica y Nuclear”.—Aguilar. 1959.

SINNOT.—“The Solid State for Engineers”.—Wiley & Sons. 1958.

VARIAN ASSOCIATES.—Boletines varios.

WATERS AND PHILLIPS.—“A new method of Measuring the earth's magnetic field”.—European Association Exploration Geophysicists Bulletin Volume IV.—March, 1956.

# LA DIFRACCION COMO MEDIO DE INTERPRETACION SISMOLOGICA

Armando Eguía Huerta y J. L. A. Orozco \*

## R E S U M E N :

Por analogía con los fenómenos clásicos que examina la física, se pretende destacar la importancia de la difracción de las ondas elásticas en la interpretación sismológica.

## I.—ANTECEDENTES

Desde hace años, los investigadores y geofísicos, buscando nuevos métodos de interpretación sismológica, han intentado establecer analogías entre los fenómenos clásicos de la difracción de la luz y la del sonido y el que podría semejársele, en la propagación de las ondas elásticas. \*\*

Existe una copiosa literatura sobre este tema que demuestra que la difracción de las ondas elásticas producidas, principalmente por accidentes estructurales existentes en los medios de propagación de aquéllas, es un fenómeno que debe ser aprovechado como medio de interpretación sismológica.

---

\* Gerencia de Exploración.—Petróleos Mexicanos.

\*\* C. Hewitt Dix en su obra "Seismic Prospecting for Oil".—Harper and Brothers. 1952.

Theodor Krey en "The Significance of Diffraction in the Investigation of Faults", publicado en "Geophysics", Oct. 1952.

Bruno Kunz en "Diffraction Problems in Fault Interpretation", Artículo presentado en Viena, Mayo de 1960, ante la Asociación de Geofísicos Europeos.

La disponibilidad actual de los registros magnéticos, con su versatilidad para mostrar los eventos sísmicos, enfatiza la importancia de la difracción, no solo porque es posible destacarla mejor cuando las secciones obtenidas han sido corregidas por elevación y "angularidad", sino porque el carácter integral de la información contenida en las mismas, permite asociarla con otros fenómenos comprendidos en la propia información y así lograr un tipo de interpretación sintética, que puede ser muy valiosa en la técnica sismológica.

## II.—EL PROBLEMA

El problema consiste básicamente en la identificación de los eventos de difracción y en el establecimiento de la relación que los mismos puedan tener con las formas estructurales presentes; por lo que, en su aspecto objetivo, puede circunscribirse, a lo siguiente:

1ro.—Identificar el fenómeno sismológico de difracción por los diversos caracteres que lo hagan distintivo y diferenciable; y,

2do.—Encontrar su explicación real y la relación causal que lo rige con el objeto de interpretarlo debidamente.

A continuación se examinarán los aspectos aludidos, como sigue:

### A).—*Identificación del Fenómeno*

En las tres figuras que a continuación se muestran se ponen ejemplos de secciones procesadas en tiempos obtenidas de registros magnéticos, en las que se observan cierto tipo de reflejos anómalos que se caracterizan por su curvatura a diferencia de los reflejos normales que aparecen sensiblemente planos.

En la figura 1, puede apreciarse que los "arqueamientos" ocurren en ambos sentidos, llegando en algunos casos a cruzarse. Fenómenos semejantes se observaron en secciones análogas, paralelas a la anterior, que al ser interpretados se estimó que su causa es debida a la existencia de fallas normales.

La figura 2, corresponde a una sección en la que los arcos se registran en un solo sentido, fenómeno que fue interpretado como producido por una falla inversa.

INTERPRETACION DE UNA FALLA NORMAL  
(Basada en arcos de difraccion  
en ambos sentidos)

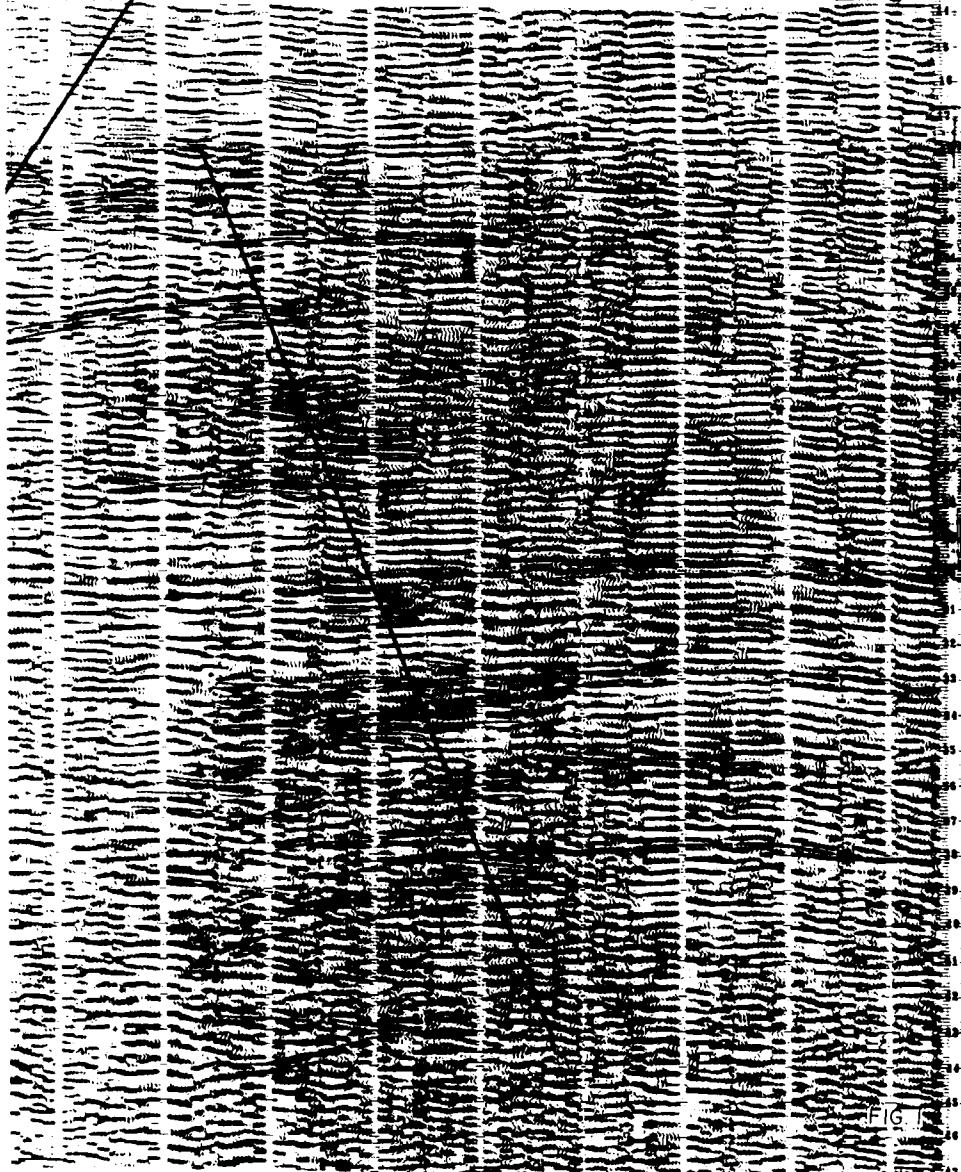
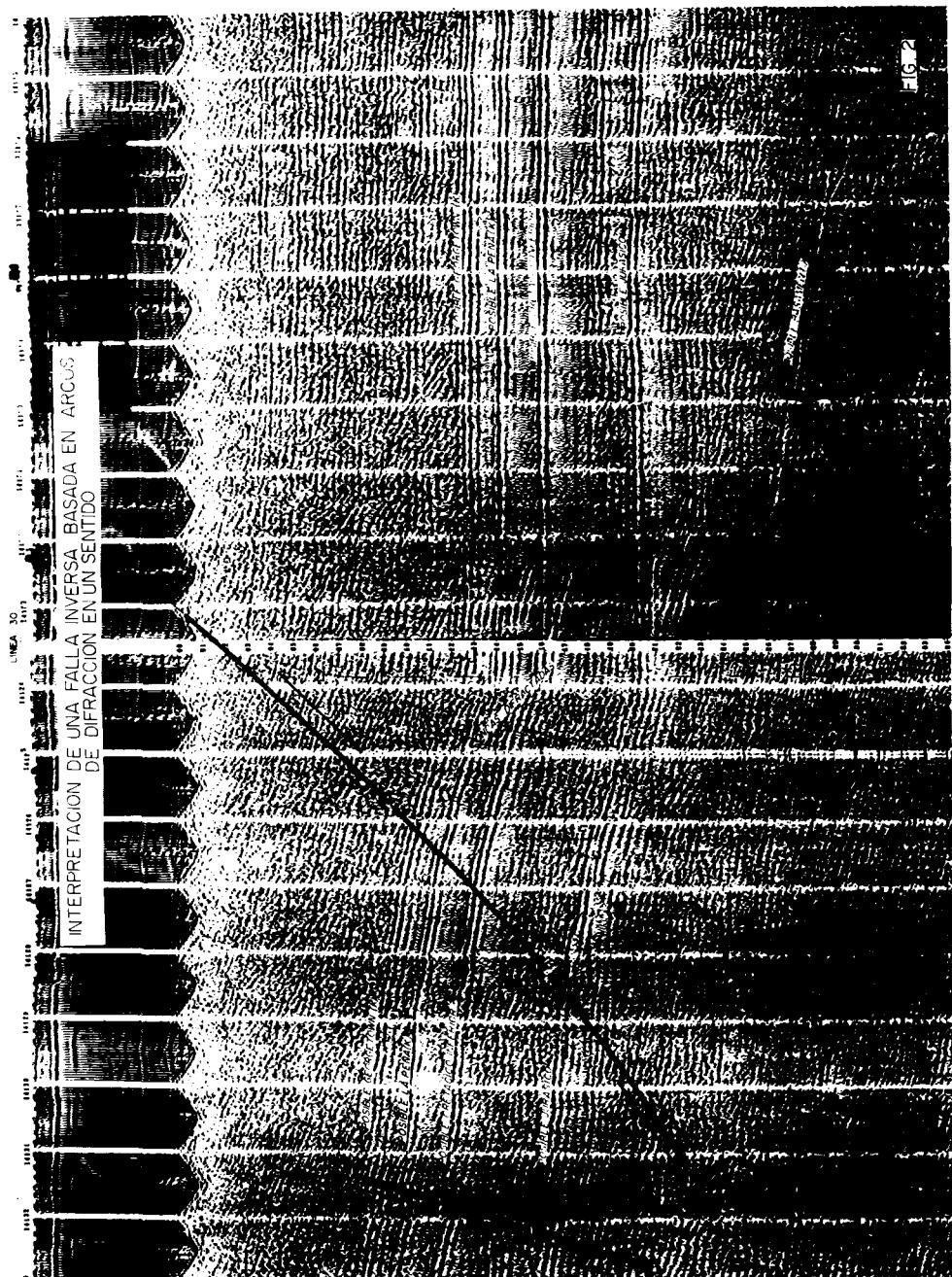


FIG.



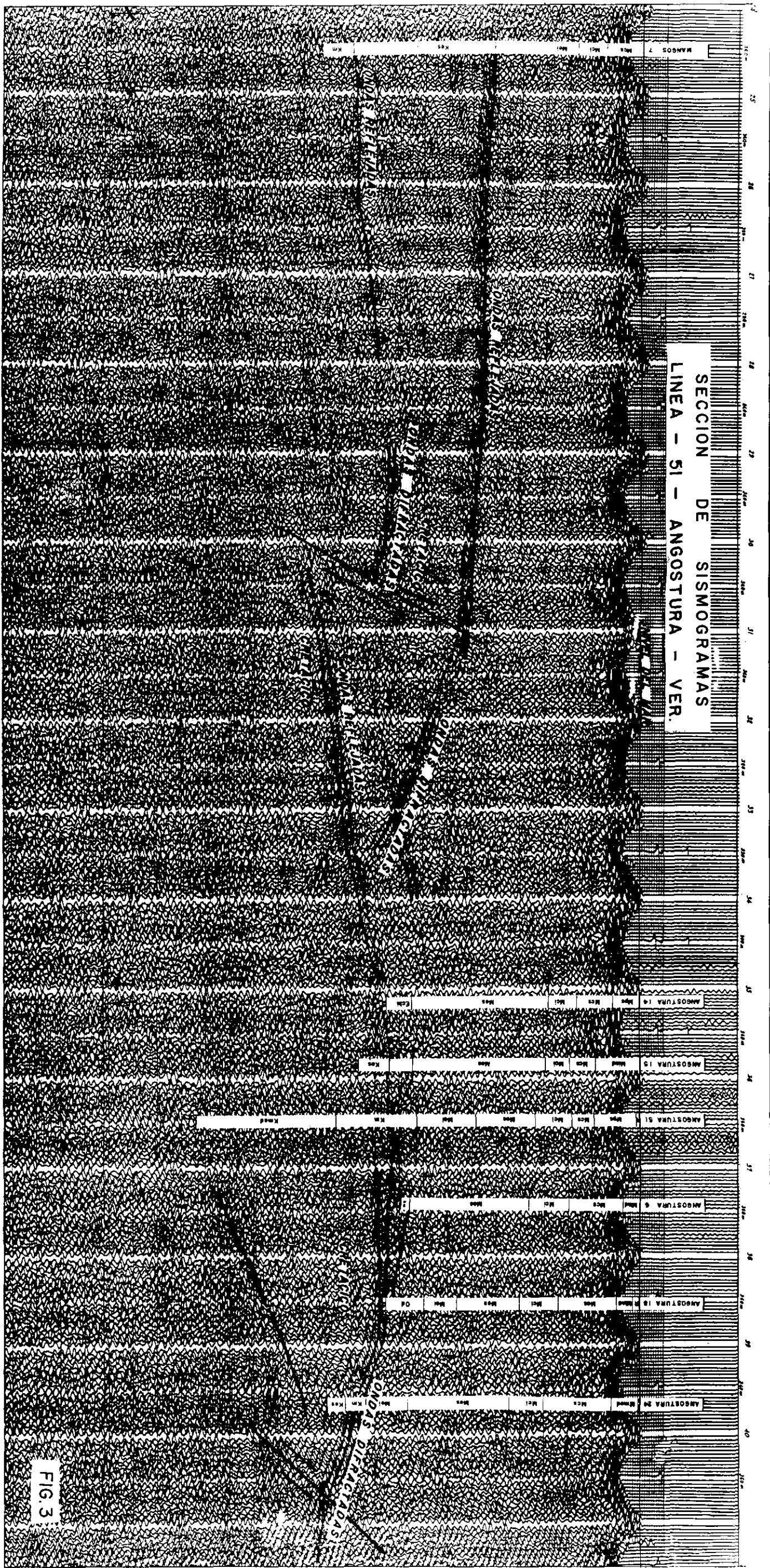


FIG. 3

Las figuras 3 y 3-A corresponden a secciones de Galvanómetros en las que se aprecian también estos “arqueamientos” de los seudo-reflejos. Los pozos perforados, que aparecen en las secciones, indicaron que se trataba de un sistema de fallas recumbentes.

El estudio de estos casos y de otros semejantes, demuestra que es posible destacar en la información sismológica, particularmente en la obtenida mediante el registro magnético, eventos que por las investigaciones realizadas, son atribuibles a la difracción de las ondas elásticas. Por lo tanto, cuando en los sismogramas sea posible identificar la energía difractada y asociarla con la existencia de formas estructurales que presenten discontinuidades tales como bordes de fallas, arrecifes, acuñamientos, cambios bruscos de echado, cambios de facies.. etc, el fenómeno de difracción será una valiosa ayuda en la interpretación.

#### B).—*Teoría del Fenómeno*

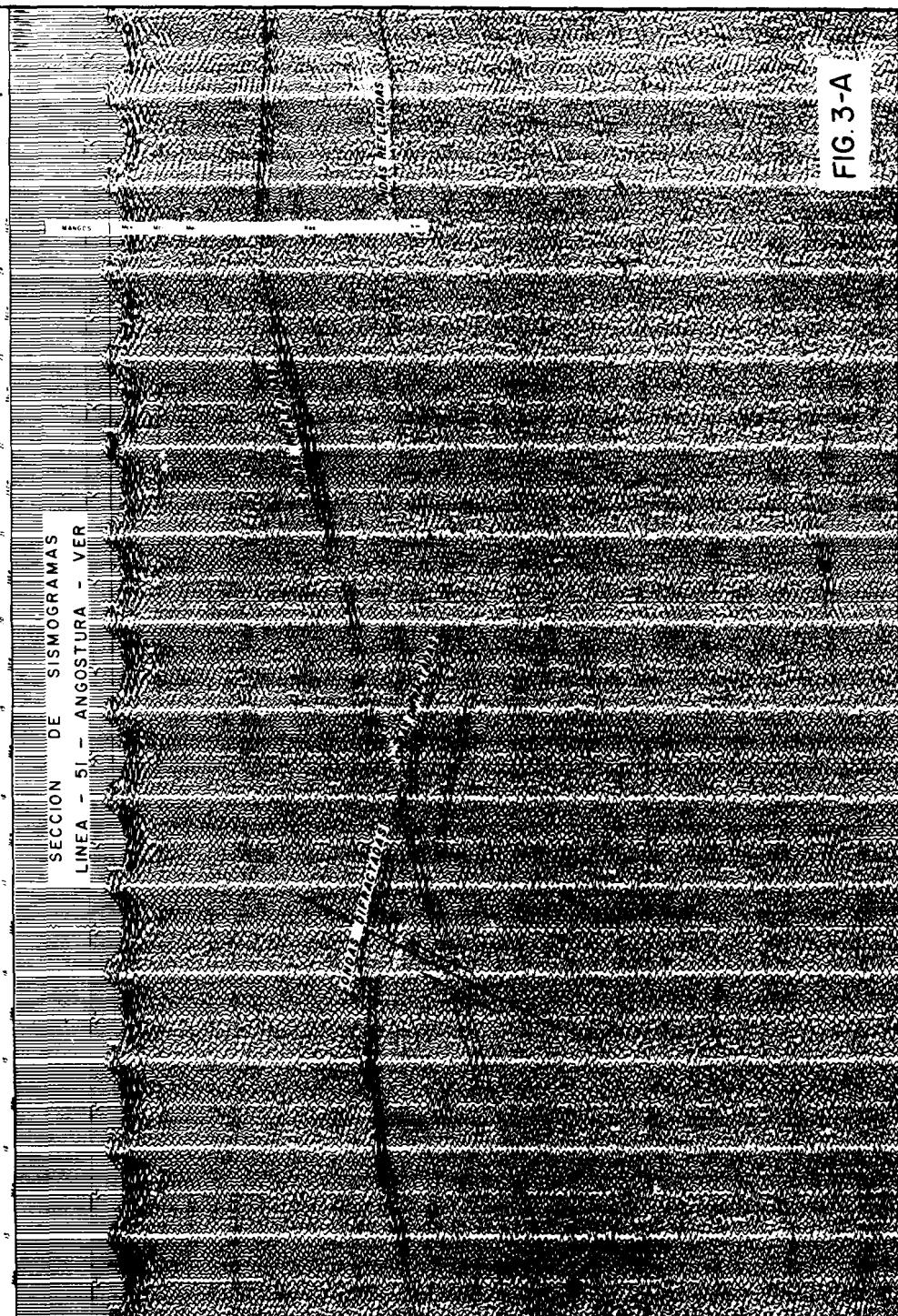
La explicación de la difracción puede hacerse en forma descriptiva o analítica. La más sencilla, es la que se hace mediante una aplicación elemental del Principio de Huygens, relativo a la propagación de la luz.

Así, en la figura 4, se muestra la formación de un frente de onda combinado cuando se registra una discontinuidad en el horizonte reflector. La aplicación de dicho Principio en este caso, demuestra que el mencionado frente de onda se forma por la combinación de dos arcos de círculo cuyos centros son: para el primero, la imagen del punto de tiro y, para el segundo, el punto de discontinuidad del horizonte reflector, en la inteligencia de que, el primero de dichos arcos representa a las ondas reflejadas en tanto que el segundo a las difractadas.

La figura 5, es un ejemplo práctico de este hecho. Representa la fotografía de un tren de ondas viajando en un medio isotrópico (agua) y los frentes de onda producidos por un reflector con una discontinuidad.

Ahora bien, si se toman los tiempos en los que el frente de onda difractado llega a cada uno de los detectores y dichos tiempos son transportados a la vertical se obtiene, como se muestra en la figura 6, la forma que toma el citado frente de onda al ser registrado en sismogramas sucesivos.

Es fácil apreciar, que el frente de onda registrado se caracteriza por una incrementación más o menos rápida de los tiempos de retraso y una limi-



PROPAGACION DE ONDAS ELASTICAS REFLEJADAS  
POR UN HORIZONTE DISCONTINUO

(MEDIO ISOTROPICO) A) PRINCIPIO DE HUYGENS

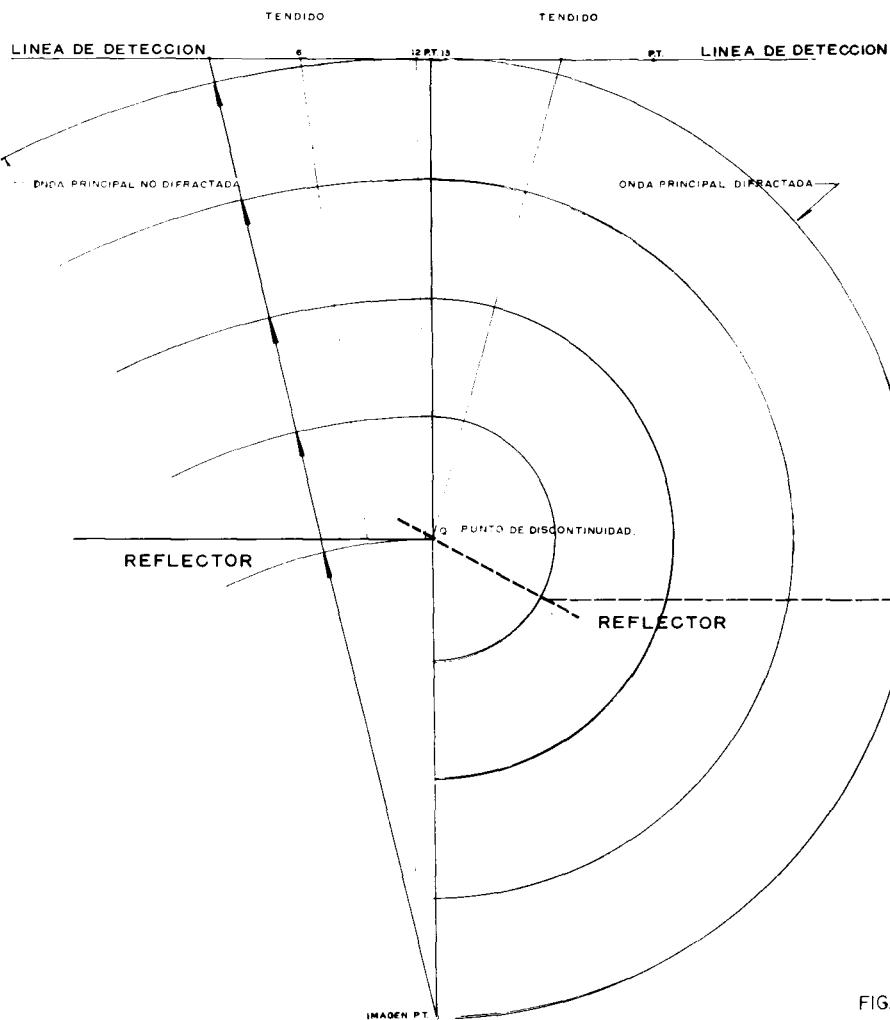
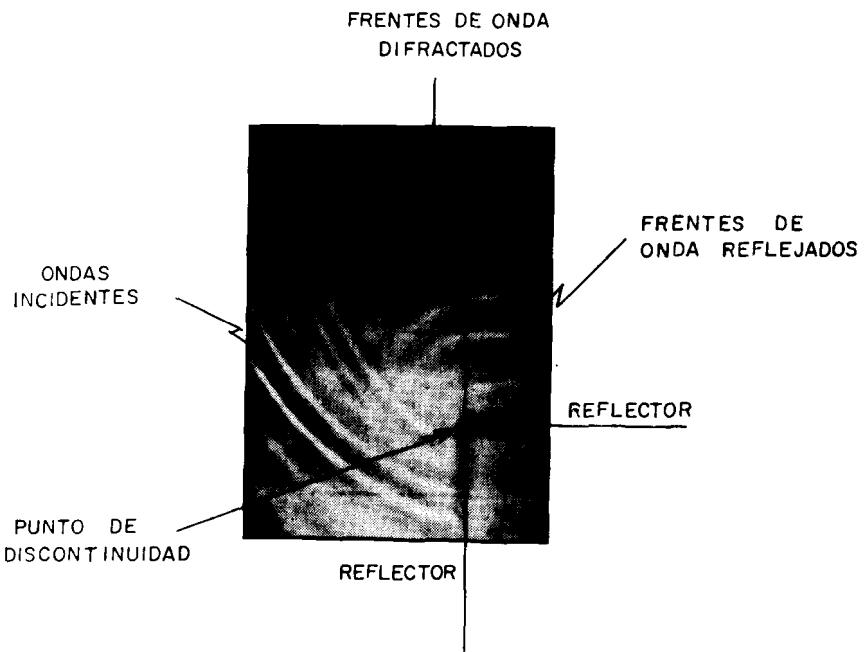


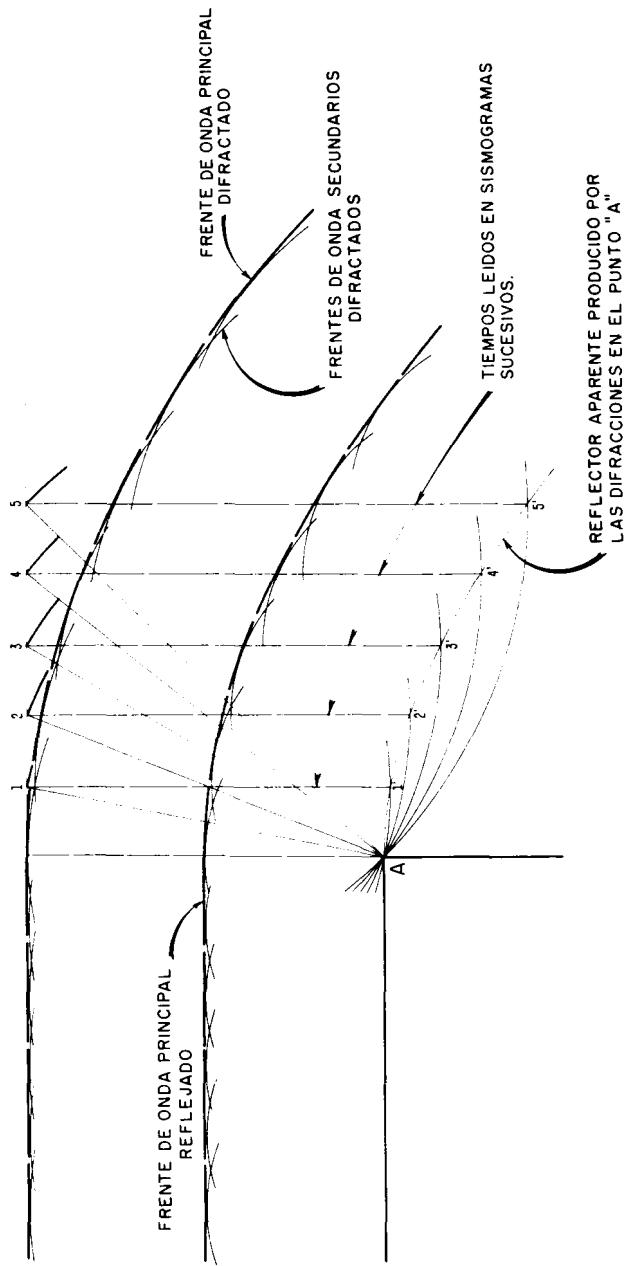
FIG. 4

## TREN DE ONDAS VIAJANDO EN UN MEDIO ISOTROPICO



Frentes de onda equivalentes a  
las producidas por las explosio-  
nes en sismología.

FIG. 5



FRENTE DE ONDA REGISTRADO  
EN SISMOGRAMAS SUCESSIVOS

tación aperente de su longitud, debido en gran parte, al rápido amortiguamiento de la energía proveniente del punto de discontinuidad del reflector en donde dicho frente tiene su origen. De esta manera se forma el arco de difracción para el caso de una falla, en la inteligencia que, si dicha falla afecta a varios horizontes reflectores, será posible distinguir en la sección tantos "arcos" o bandas de energía que adopten dicha forma, como horizontes reflectores tenga el perfil geológico que representa la sección. Estos arcos serán más o menos conformes y su longitud dependerá de la profundidad relativa del punto de discontinuidad de cada horizonte.

En la figura 7, se muestra el caso de una falla normal con dos puntos de discontinuidad que equivalen a otros tantos centros de ondas difractadas cuya detección en la sección, depende, principalmente, del sistema de tiro empleado. En este caso los arcos de difracción aparecen en ambos sentidos.

En la figura 8 se muestra el caso teórico de ondas reflejadas y difractadas en un horizonte con dos discontinuidades en la que se señalan las distribuciones de amplitudes y tiempos de retraso.

Es así como, mediante la aplicación del Principio de Huygens es posible dibujar todos los casos teóricos posibles de difracción de las ondas elásticas y obtener, de esta manera, patrones que sirvan de guía a la interpretación de los datos sismológicos, recabados en el campo.

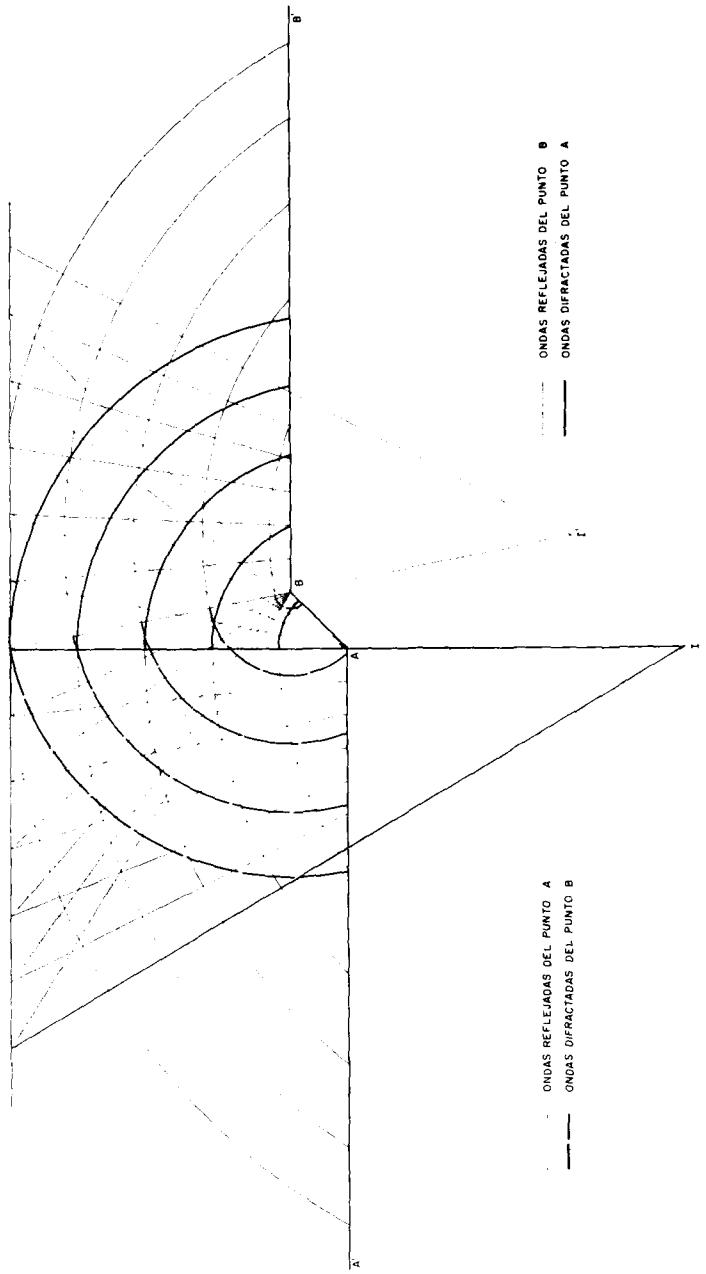
### III.—APLICACION PRACTICA

Las consideraciones precedentes demuestran que la difracción es un fenómeno natural en la propagación de las ondas elásticas, registrable en los sismogramas, que al ser interpretados debidamente, puede significar un auxiliar muy valioso en la interpretación sismológica.

Las secciones procesadas que, como ya se dijo, tienen la ventaja de estar corregidas por elevación y angularidad, hacen más patente esta posibilidad, facilitando la aplicación de una serie de reglas, probadas teóricamente, que al ser comprobadas en la práctica, conducirán a una técnica de interpretación sismológica por difracción.

Así por ejemplo, en la figura 9, se presenta la comparación de secciones en la interpretación de una falla inversa. La parte superior en la figura citada, corresponde a la sección desplazada en profundidades en la que, con tra-

CASO DE UNA FALLA NORMAL CON DOS PUNTOS DE DISCONTINUIDAD



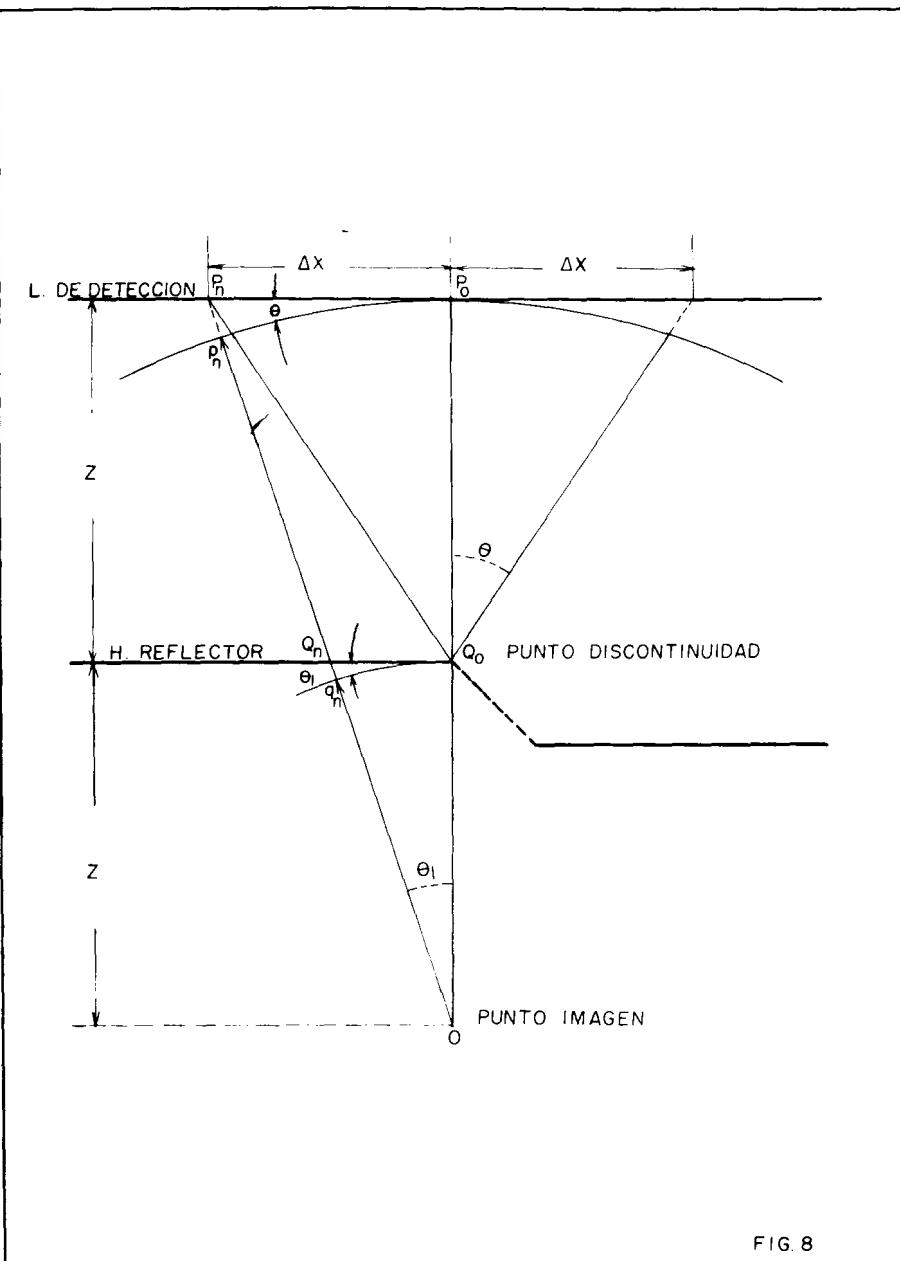


FIG. 8

COMPARACION DE SECCIONES EN LA INTERPRETACION  
DE UNA FALLA INVERSA

SECCION DESPLAZADA  
(Profundidad)

SECCION PROCESADA  
(Tiempo)

SECCION PROCESADA  
(Tiempo)

FIG. 9

zo débil, aparecen los arcos de difracción que, al ser migrados con la ley real de velocidades, se han situado sobre los puntos que originaron las difracciones que dichos arcos representan.

En la parte inferior de la misma figura, se muestra la sección procedida correspondiente al mismo tramo, en la que la interpretación de la falla se basó, exclusivamente, en la identificación de los arcos de difracción.

En la figura 10, se muestra una técnica sencilla que puede servir para determinar el plano real de una falla a partir de las difracciones. Si en dicha figura se supone que los reflejos de mayor curvatura corresponden a difracciones provenientes de un punto, los arcos de círculo trazados con la ley de propagación adecuada desde el lugar en que aquéllas fueron observadas y que representan la profundidad aparente, deberán interceptarse en un punto que corresponde a la discontinuidad del horizonte reflector. Uniendo los puntos correspondientes a cada horizonte reflector, se tendrá la traza de la falla a partir de su borde superior.

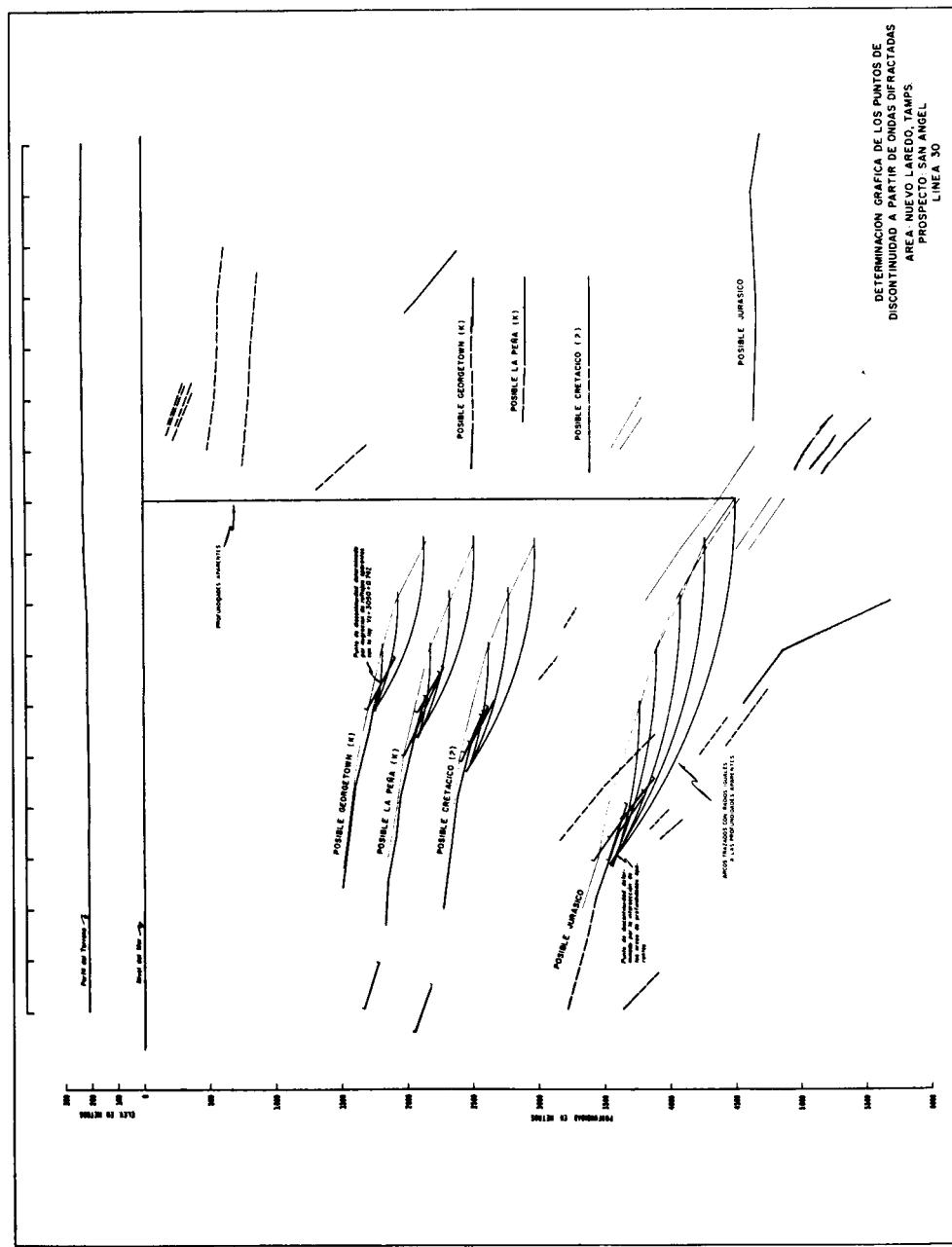
En esta forma es posible situar también el punto de inflexión cuando se trate de un arrecife, de un cambio brusco de echado, etc.

Es así como resulta, relativamente sencillo, visualizar los arcos de difracción y con ellos obtener un auxilio notable para la rápida identificación de ciertos fenómenos estructurales sin necesidad de recurrir, sino en casos muy especiales, a la elaboración de secciones migradas.

Como consecuencia de todo lo anteriormente expuesto, se formulan algunas reglas auxiliares de interpretación, como sigue:

1ra.—Todos los reflejos que en los registros presenten una incrementación de tiempo a lo largo de la línea de detección, pueden corresponder y ser identificados como ondas difractadas, que al ser pasadas a las secciones convencionales de tiempo, originan arcos que concurren en un punto que corresponde a una discontinuidad o a una inflexión del horizonte reflector cuando los mismos han sido desplazados con la ley adecuada;

2da.—En secciones migradas en profundidad, ocasionalmente puede ocurrir que, por la aplicación de una ley de propagación incorrecta, no se haya logrado el cruzamiento en un punto de dichos seudo-reflejos, en cuyo caso, éstos aparecerán con echados contrarios o erráticos que pueden ser considerados como indicativos de focos de difracción;



3ra.—Los impulsos que se registren en sismogramas sucesivos en forma de arcos de extensión limitada, pueden atribuirse a la difracción de las ondas elásticas. Si dichos arcos se presentan como extensiones de reflejos de menor curvatura el punto de inflexión indicará, en forma aproximada, la localización de los focos de difracción;

4ta.—Los focos de difracción en una sección, corresponden a puntos de discontinuidad en el sentido de la estratificación. Estos puntos pueden identificarse con formas estructurales tales como: bordes de fallas, arrecifes, cambios bruscos de echado, cambios de facies, etc.;

5ta.—Cuando una o más bandas de energía muestren arcos de difracción en un solo sentido (véase figura 2), asociadas con reflejos erráticos de fuerte echado, se puede suponer que se trata de una falla inversa o de un cambio de echado; y,

6ta.—Cuando los arcos de difracción se registren en dos sentidos (véase figura 1), será indicativo de la existencia de una falla normal.

#### IV.—CONCLUSIONES

Aunque la interpretación sismológica en la que se tomen en cuenta los fenómenos de difracción no es nueva, es importante hacer notar que, en lo general, no se le ha concedido la importancia que merece.

En realidad, sus posibilidades como un medio complementario de interpretación, son muy significativas, especialmente cuando ésta se realiza empleando secciones procesadas de registro magnético.

Cuando las difracciones son identificadas en las secciones se puede obtener, de una manera relativamente rápida, interpretaciones bastante aproximadas sin necesidad de recurrir, sino para casos específicos a los métodos convencionales.

# “FORO ABIERTO”

## DESVENTAJAS EN EL EMPLEO DE FILTROS DE PASO DE BANDA ANCHA

Por el Ing. *Antonio C. Limón.* \*

Las diversas técnicas de campo en trabajo sismológico tienen actualmente por objeto simplificar la tarea de identificación de reflexiones, aprovechando los diseños instrumentales y los ajustes óptimos de los equipos para lograr una máxima relación señal-ruido.

Estos adelantos en la técnica instrumental suelen ser desperdiciados o mal aplicados al emplear filtros que permitan un ancho paso de banda (20 a 230 cps) por las razones siguientes:

a).—En la mayoría de los casos, el ruido por viento o por disturbios secundarios corresponde a la región de alta frecuencia del espectro sísmico; por lo tanto, al emplear un filtro abierto, esta interferencia afecta grandemente los eventos de reflexión, dificultando su identificación.

Esto no quiere decir que el reflejo sea eliminado, ni que pierda sus características, si no que únicamente queda mezclado con interferencias y la tarea del sismólogo resulta más complicada. Es frecuente, para reflexiones profundas, que la intensidad de éstas no sea suficiente para manifestarse con claridad y en estas condiciones la relación señal-ruido es sumamente baja. En cambio, un filtro apropiado, puede eliminar gran parte de esa interferencia, mejorando así la calidad del sismograma.

b).—Un ancho paso de banda permite pasar un mayor número de armónicas, cuya frecuencia fundamental es de baja frecuencia, teniendo por consiguiente una mayor distorsión en la señal, como puede verse en las siguientes gráficas.

---

\* Gerencia de Exploración, Petróleos Mexicanos.

**CARACTERISTICAS DE MISIONES EN  
UN AMPLIFICADOR S.I.E. CA-13**

Amplificadores:

GANANCIA: 100 X, 75 X, 60 X, 40 X, 25 X

VIBRATORES: 1/20 - 1/12.5

SUBSISTEMON: 0.75 CPS

AUMENTO: 100 X

MAGNITUD: 10 cps

PERIODICO: 10 cps

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

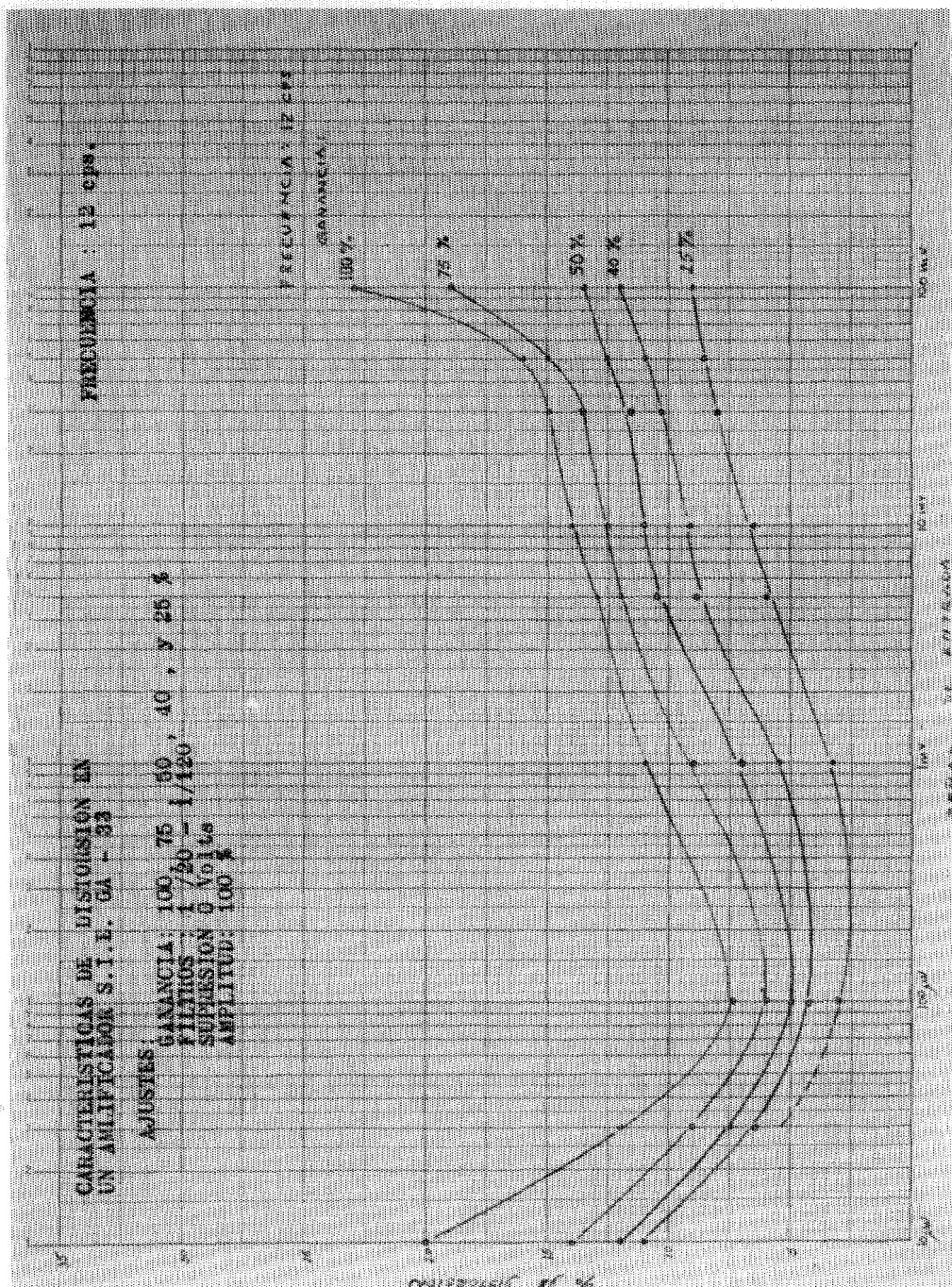
?

?

?

?

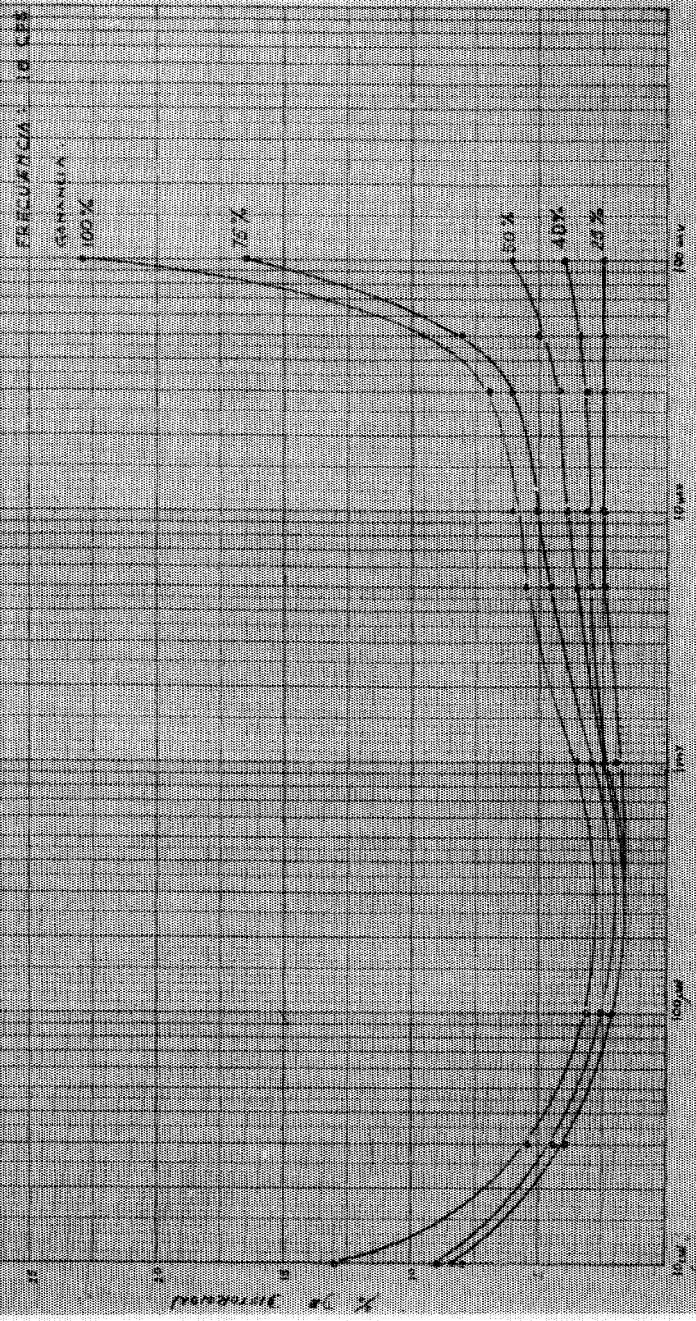
?

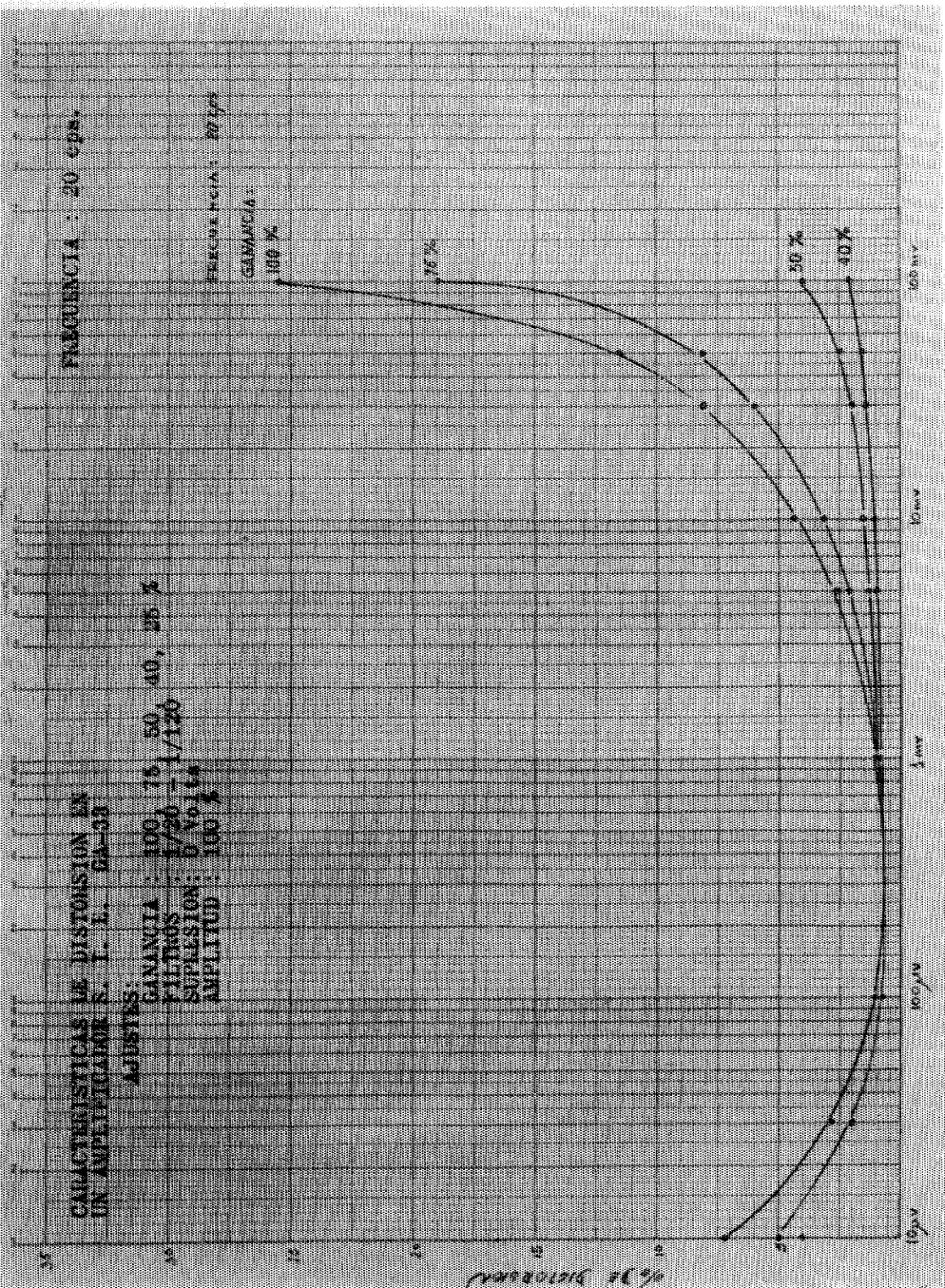


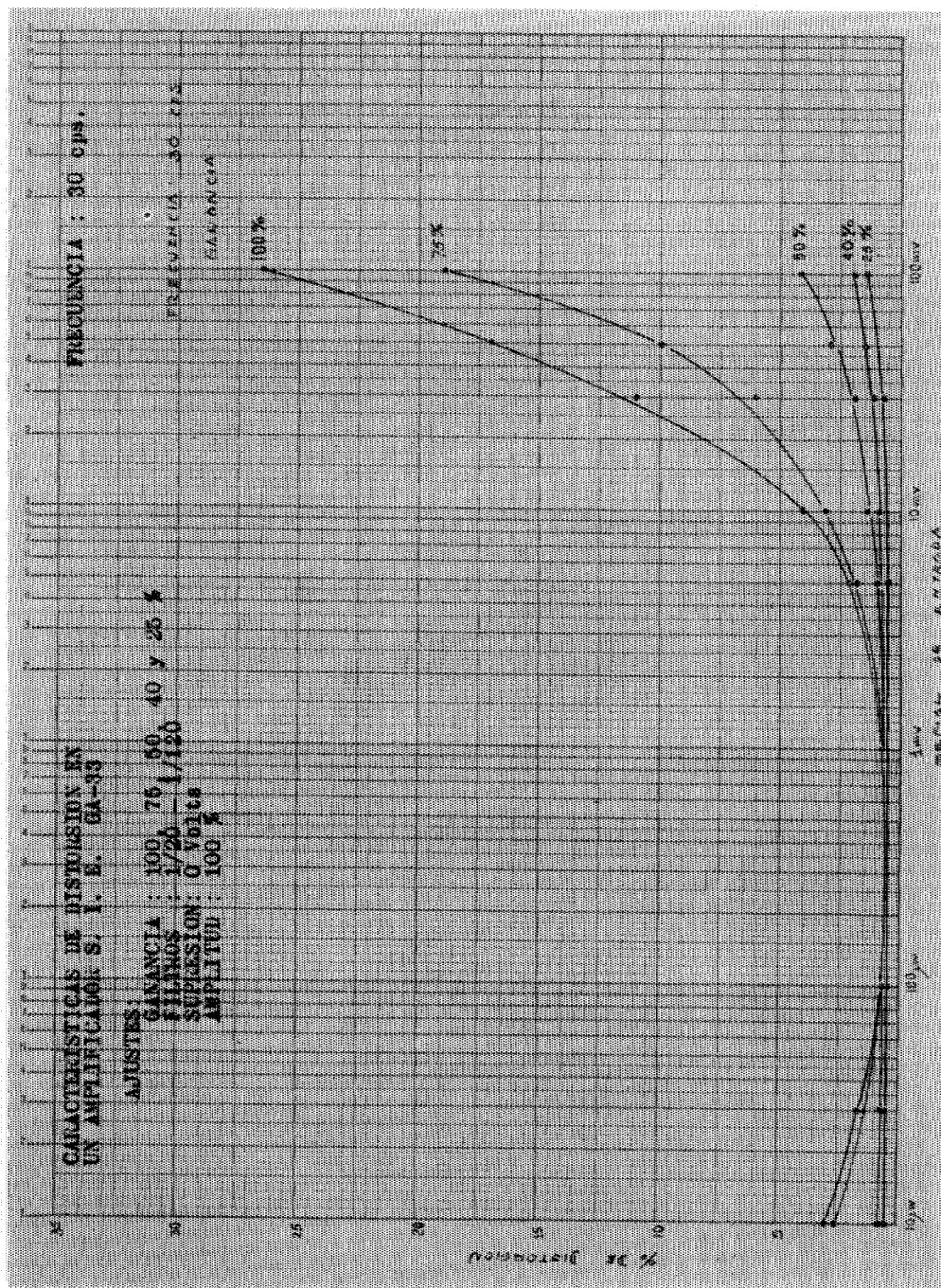
Caracteristicas de susension en  
un amplificador S. 1. E. 6K-33

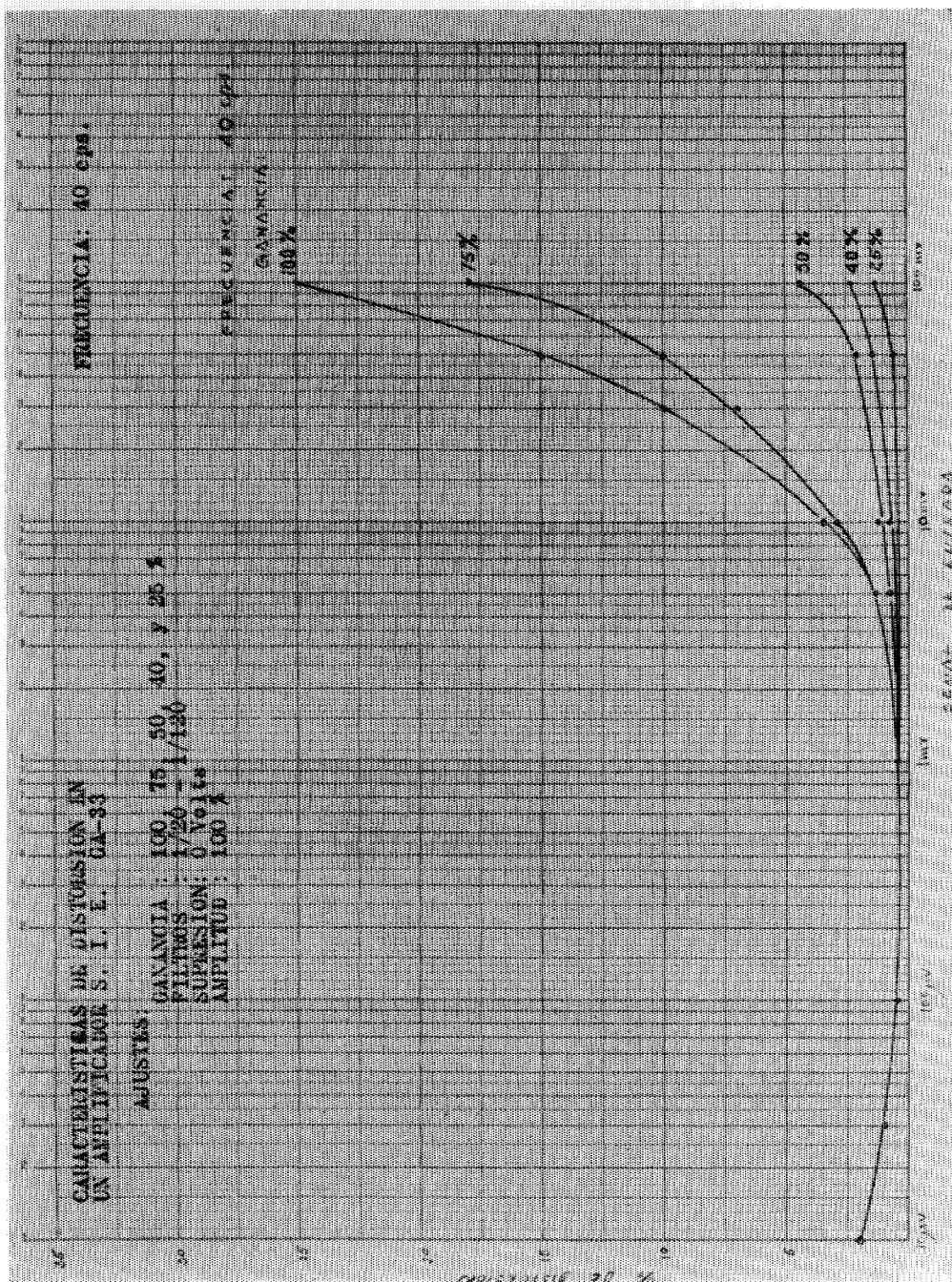
Ajustes: GAINANCIA: 1000, 75, 50, 40 y 25 %  
TIEMPOS: 1/20 - 1/120  
SUSENSION: 6 Volts.  
AMPLITUD: 1000 %

RECUPERACION: 100 c.p.s.





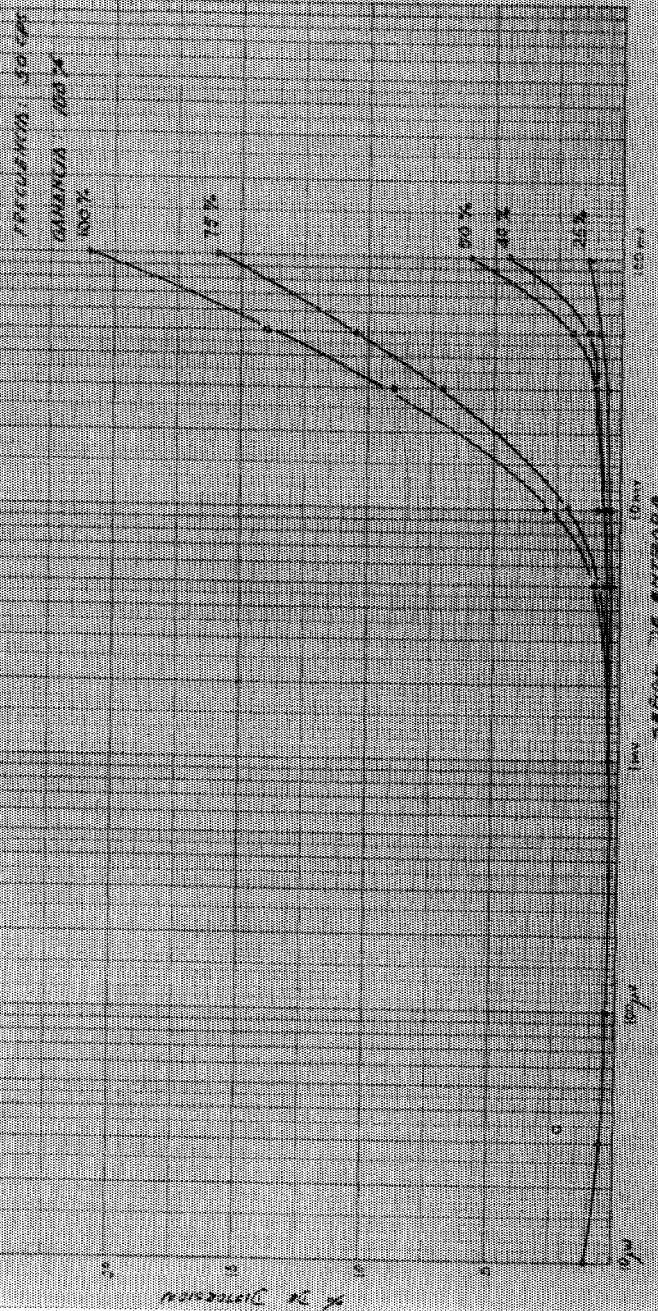




**CARACTERISTICAS DE DISTORSIONES  
EN AMPLIFICADOR S. 1. E. G/20**

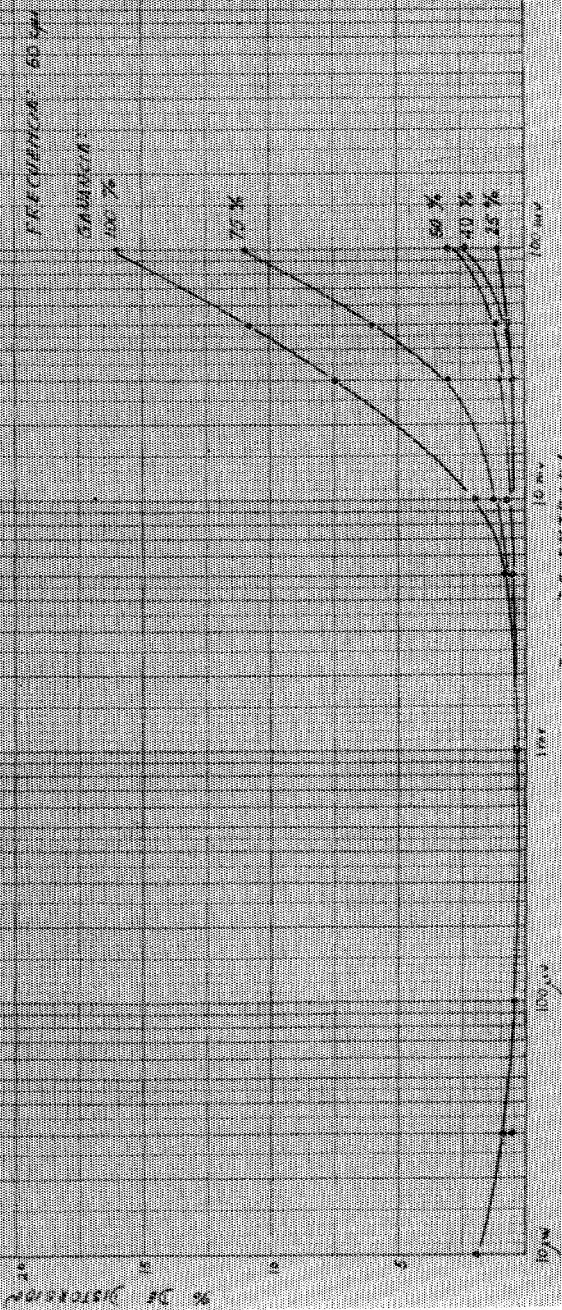
Lentes de MANIFACTA 100% 75% 50% 40% Y 25%  
 PRIMARIAS 1/20 - 1/120  
 SUPERASSUK 5 Volts.  
 HUMIDIFICADO 100%

PULVERENCIA : 50 cps



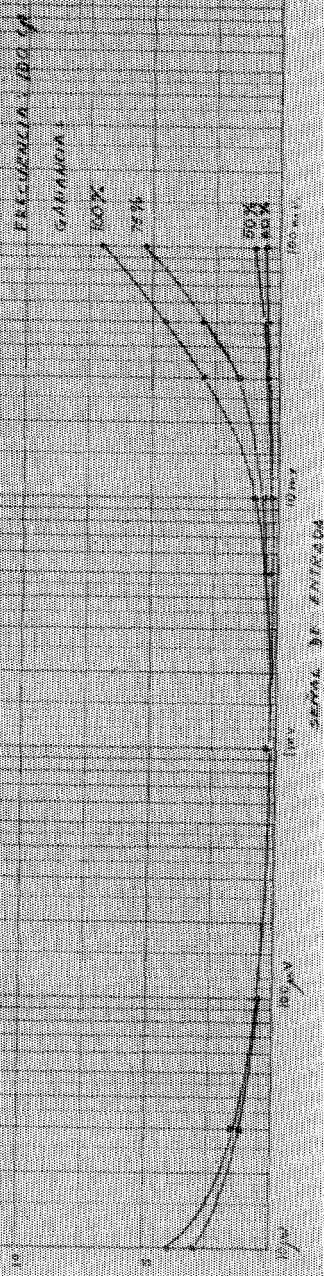
CARACTERISTICAS DE DISTORSION EN  
UN AMPLIFICADOR S. I. E. 6A+35  
AJUSTES: CIVILIANA: 100% 75% 50% 40% Y 25%  
CIRCUITOS: 1220 1211 1201  
SALIDA: 0 VOLTS  
ALIMENTACION: 100 V.

FRECUENCIA 60 cps.



**CARACTERISTICAS de DISYONCTIONES EN AMPLIFICADOR S. I. P. 01-23**

**AMOSTRAS:** PANAMA: 1000, 750, 500, 400 y 250 g.  
 PINTOS: 1720 - 17120  
 SUPERSUNK 0 Volts.  
 AMPLIFICO 1000 g.



c).—En las cámaras oscilográficas comerciales, comúnmente usadas en sismógrafos, se dispone de galvanómetros cuya frecuencia nominal son 200 cps, sin embargo, una prueba de Laboratorio, como se muestra a continuación, indica que la máxima frecuencia corresponde a 170 cps; por lo tanto es inútil abrir excesivamente el ancho de banda hacia la región de alta frecuencia ya que la respuesta del galvanómetro representa en sí un filtro.

### PRUEBA DE GALVANOMETRO

MARCA: SIE

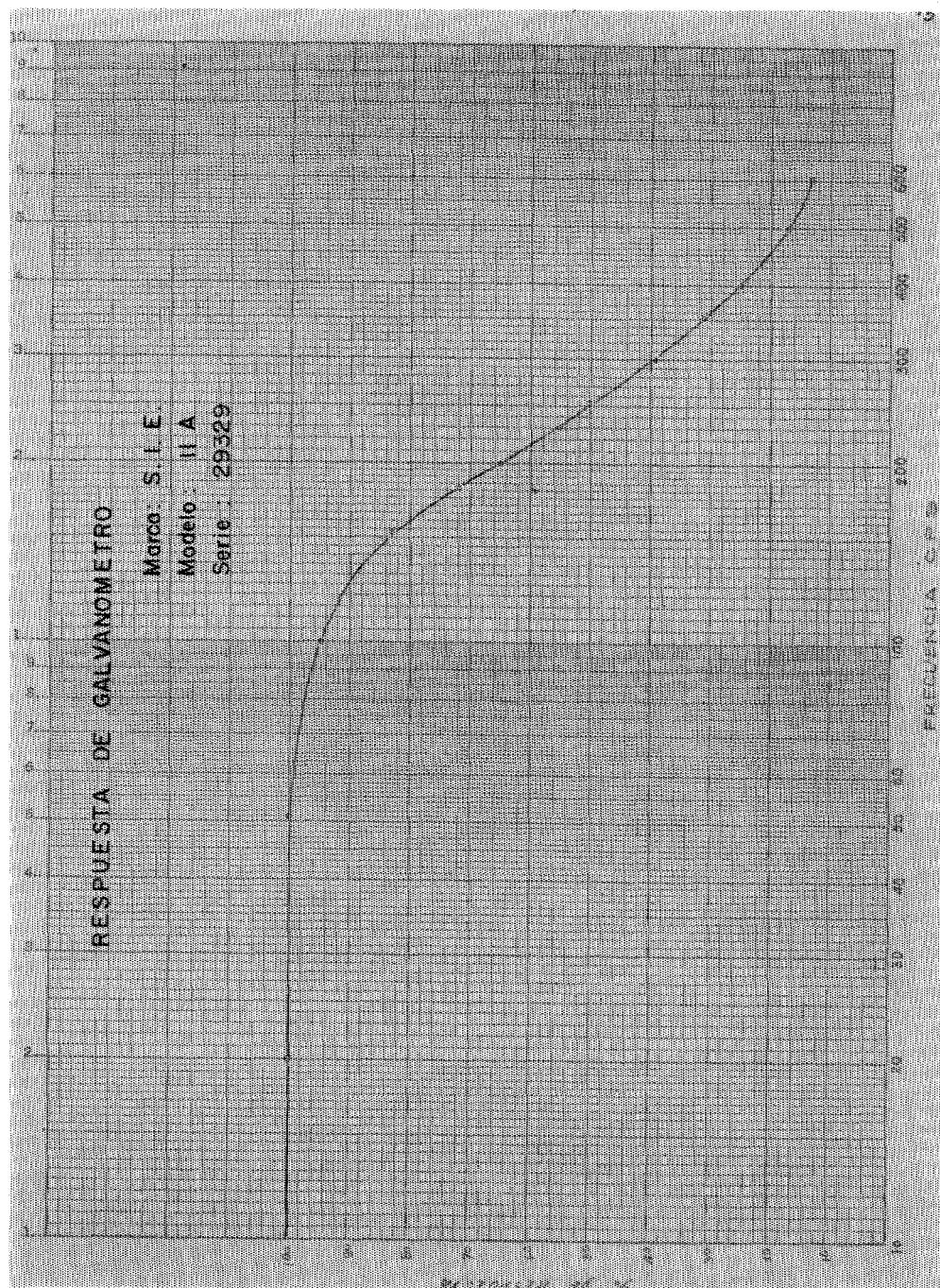
TIPO: 11 A

SERIE: 29 329

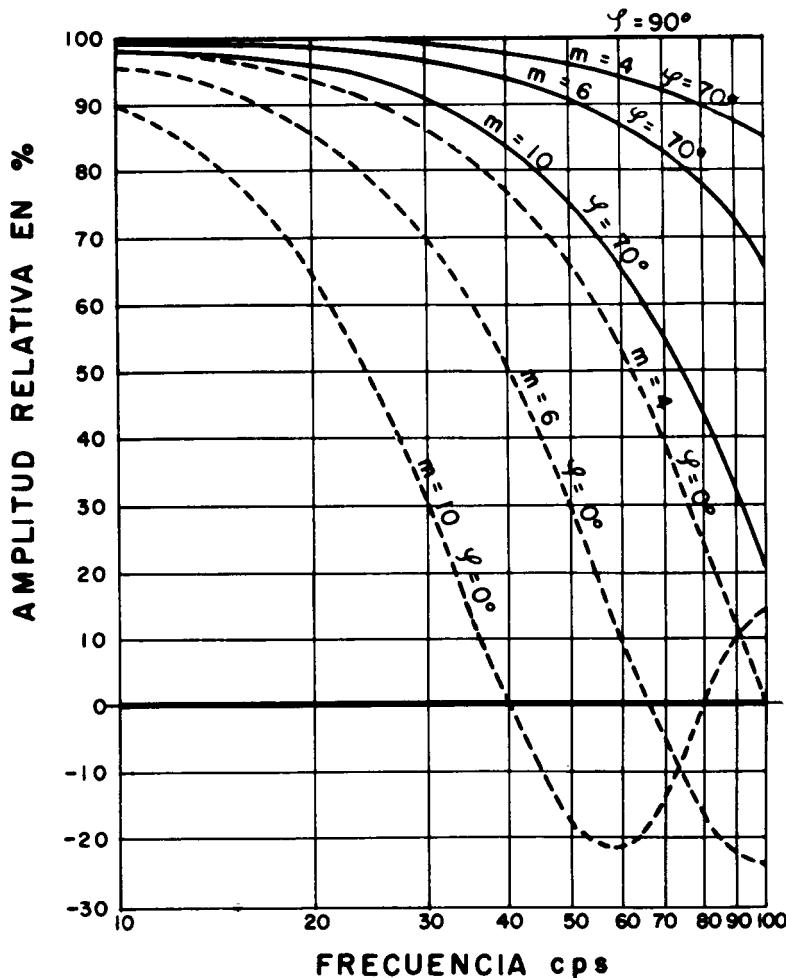
Frec. Medida	Frec. Leída	Amplitud mm	% de Amplitud
20	20	25.3	100
50	51	25.3	100
100	100	24.0	95
150	152	21.0	83
180	181	18.3	72
200	200	16.4	65
230	230	14.0	55
250	252	12.8	51
300	300	10.0	39
350	350	7.8	31
400	400	6.2	25
500	500	4.2	17
600	600	3.2	13

**RESPUESTA DE GALVANOMETRO**

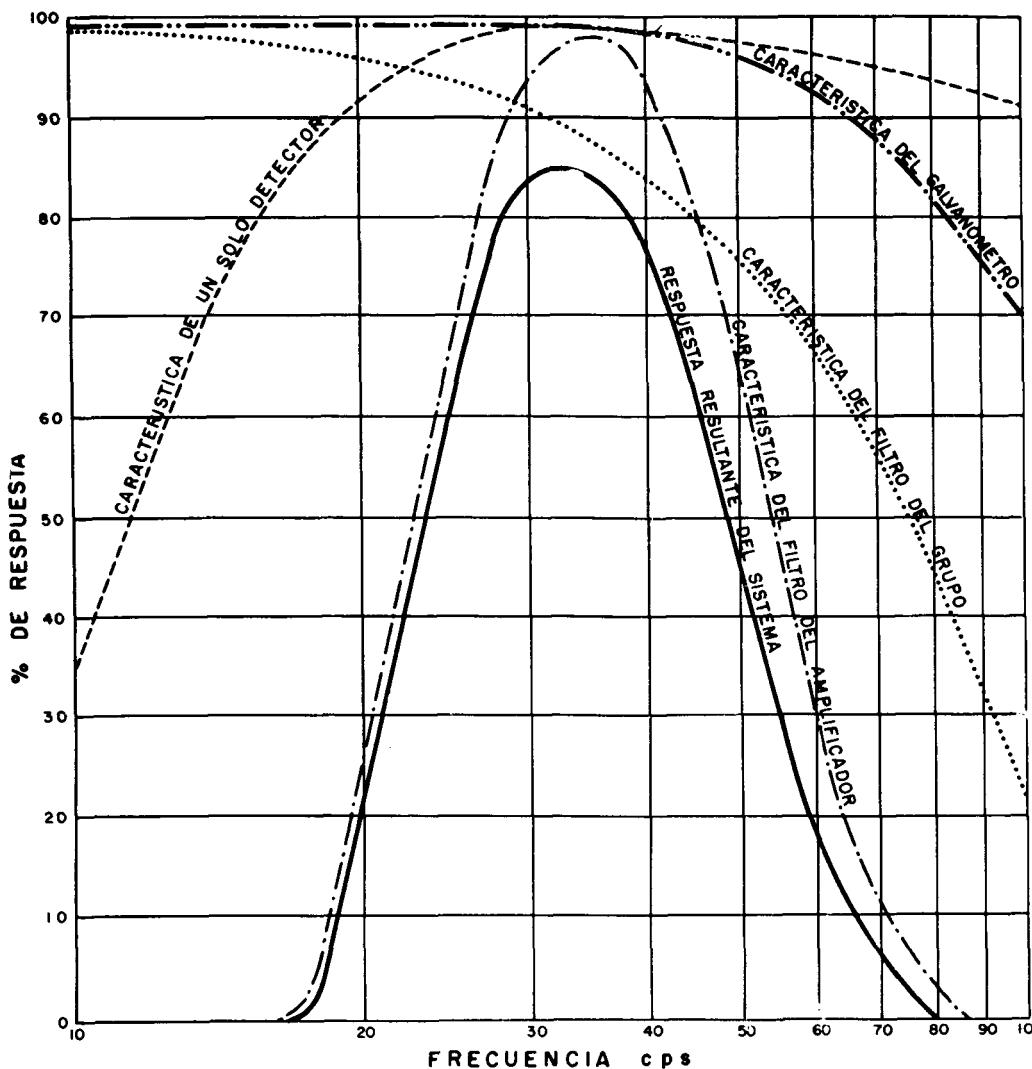
Marco S.I.E.  
Modelo: H.A  
Serie: 29329



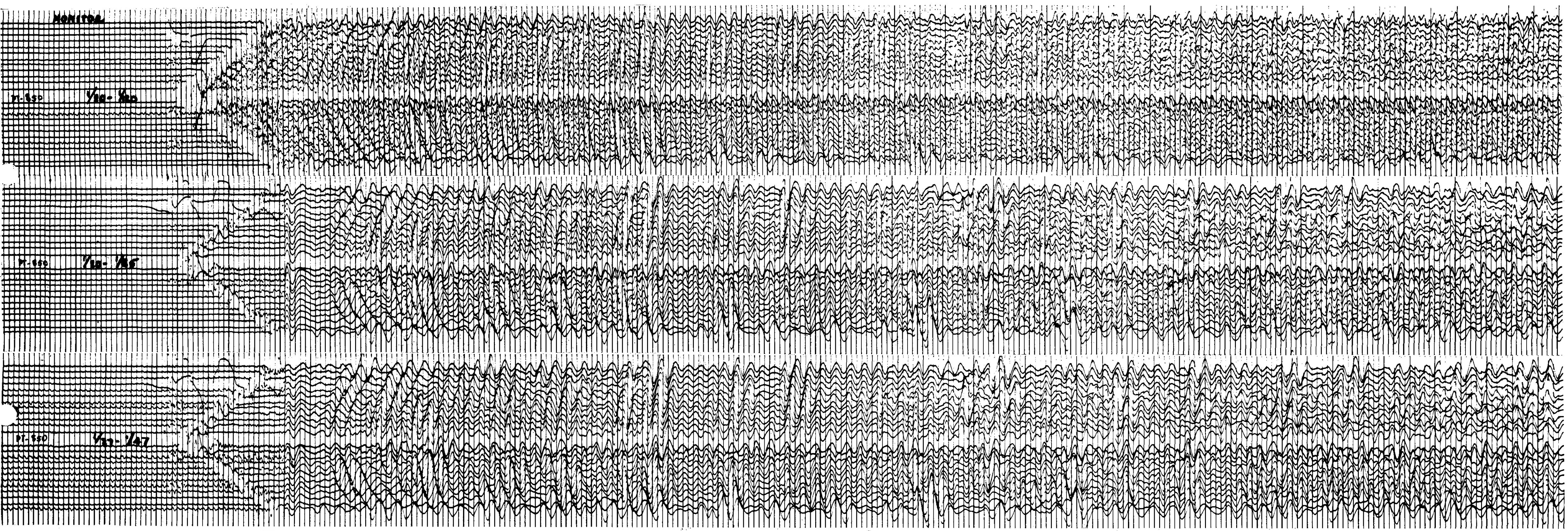
d).—En el caso en que se usen sismos múltiples resultará totalmente contradictorio emplear un ancho paso de banda, ya que cada grupo de sismos tiene una selectividad de frecuencia tal, que representa un filtro para eliminación de altas frecuencias, siendo éste más crítico a medida que se aumenta el número de sismos por traza. Esta condición se muestra en las gráficas siguientes y se detalla en el artículo: "ASPECTO SOBRE EL USO DE SISMODETECTORES MULTIPLES" del boletín de la Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración, Volumen II No. 1.



## CURVAS DE SELECTIVIDAD DE FRECUENCIA PARA DIFERENTES ANGULOS DE ARRIBO Y DIFERENTE NUMERO DE DETECTORES

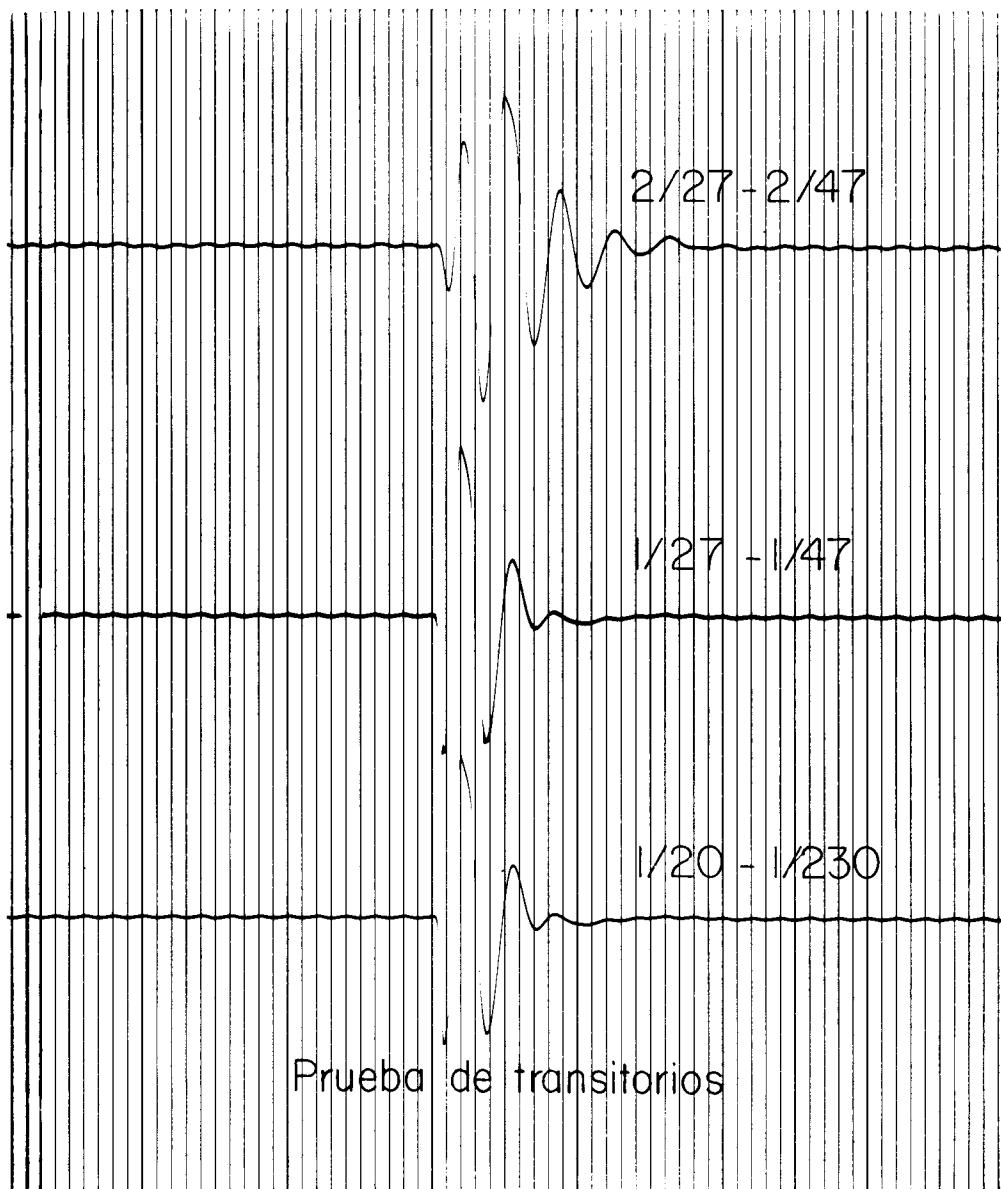


— RESPUESTAS INDIVIDUALES Y RESULTANTE DE UN CANAL SISMOGRAFICO.



EJEMPLO DE FILTROS EMPLEADOS EN EL AREA ‘LAGUNA MADRE’

e).—Existe la errónea creencia de que un filtro de paso de banda angosta ( $1/27 - 1/47$ ) da lugar a un transitorio más prolongado que con filtro de paso de banda ancha ( $1/20 - 1/230$ ), para un mismo impulso, esta condición se muestra en la siguiente figura en la que puede observarse la semejanza de los transitorios para estos filtros. Sin embargo, cuando se emplean dobles secciones de filtros, sí se hace manifiesto el efecto de un mayor transitorio. Por lo tanto, el llamado “caracter” de un reflejo no se pierde, al reducir el paso de banda si se usa una sección sencilla de filtrado.



**NUEVOS SOCIOS**

Ing. José Alemán Alvarez.  
José Ma. Olloqui No. 48.  
México, D. F.

Ing. Antonio Camargo Zanoguera.  
Rep. de Cuba No. 303 Nte.  
Cd. Madero, Tamps.

Ing. José Carrillo Bravo.  
Carpintero No. 552 Poniente.  
Tampico, Tamps.

Ing. Sergio Enrique García del Toro.  
Héroes No. 107.  
Guadalajara, Jal.

Ing. Eliseo Reyes Domínguez.  
Av. Hidalgo No. 1105 A.  
Tampico, Tamps.

Ing. Eugenio Treviño García.  
Av. Hidalgo No. 1807 Altos No. 1.  
Tampico, Tamps.

Ing. José Guadalupe Viveros Zúñiga.  
Camerino Mendoza No. 222.  
Col. Morelos.  
Pachuga, Hgo.

## N O T A   N E C R O L O G I C A



Borja, España; 22 de diciembre de 1881.

Ciudad de México, México; 5 de Febrero de 1962.

En el último invierno, ocurrió el deceso de nuestro excelente amigo y compañero, el Sr. Doctor Honorato de Castro Bonel. Científico distinguido, entusiasta y dinámico, amaba las disciplinas del espíritu por sobre muchas otras cosas; vivió entregado al estudio y, para sus amigos y compañeros, fue siempre bien dispuesto para la consulta, constituyendo un valioso asesor en cuestiones de Ciencia, Historia y Literatura; exhibía con amplitud sus conocimientos en el idioma castellano; sus latines, notables y oportunos, fueron siempre la expresión de su alta cultura, lo mismo al discutir sobre la lengua de Cervantes que al calor de una reunión de amigos, en las que fue siempre oportuno su, digamos, "gracejo latínico".

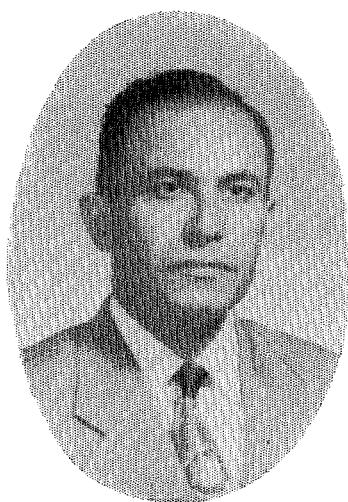
Hombre de fácil expresión y con espíritu de “sembrador”, era muy ameno en sus dissertaciones anecdotico-históricas sobre Arte e Historia. No pudo guardar para sí, todo el acervo de conocimientos que adquiriera en su vida de estudio, y se desbordó en variadas formas su deseo de enseñanza. Fue maestro de altos niveles didácticos, escribió gran número de artículos científicos y técnicos, ya en Astronomía, ya en Geofísica, ya en Matemáticas. Tal vez su inquietud por la enseñanza le hizo escribir unos cuantos centenares de artículos de divulgación científica, histórica y literaria, de clara exposición, didácticos y siempre amenos. La versatilidad y amplitud de sus conocimientos fue característica de su personalidad.

Entre sus amigos exploradores deja un gratísimo recuerdo, como científico de altos relieves, como caballero y como amigo. Descanse en Paz.

De su curriculum vitae, extractamos los siguientes datos biográficos:

Científico español de relieve, fue diplomado en Ciencias Exactas en la Universidad de Zaragoza, España y doctorado en la Universidad de Madrid.

Por oposición obtuvo su ingreso al Observatorio Astronómico de Madrid, España, y las cátedras de Cosmografía, de Física del Globo, de Astronomía y de Geodesia, en la Universidad de la propia Capital Española. Fue académico de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid. Perteneció a la Unión Geodésica Internacional, a la Unión Astronómica Interacional, al Comité Internacional para la formación del mapa del Imperio Romano y a la Asociación para el Progreso de las Ciencias. Presidió el Patronato del Museo Naval y la Comisión Científica del Ateneo de Madrid. Fue representante de España en Ginebra, Suiza, para la reforma del calendario, y, en numerosos congresos científicos celebrados en Europa y en América. Con el Gobierno de los Estados Unidos, trabajó durante tres años como Ingeniero Civil, en el Departamento de Guerra. Y, ya como residente en México, formó parte del Centro de Investigación Científica de Nuevo León y trabajó durante diecisiete años como Geofísico, en la Gerencia de Exploración de Petróleos Mexicanos.



### **José Luis A. Orozco**

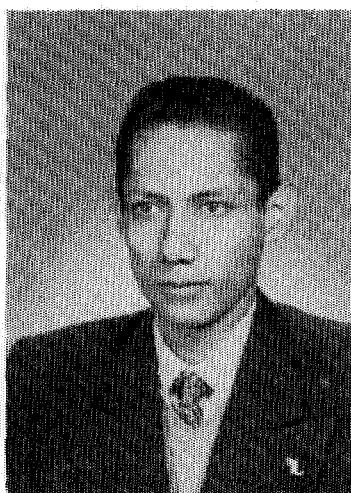
Obtuvo un grado académico de la Universidad de Guadalajara, Jalisco, México, en Ingeniería Eléctrica en el año de 1931. Dedicado a la docencia técnica en el Estado de Sonora hasta 1935, trabajó al servicio del Gobierno Federal de México en diversos puestos técnicos y administrativos hasta el año de 1953. En 1947 hizo estudios de Post-Graduado en EE. UU. Trabajó de 1953 a 54 para la General Electric de México, ingresando a Petróleos Mexicanos en 1955 como Geofísico dependiente de la Gerencia de Exploración de dicha Institución.



### **Enrique del Valle T.**

Nació en México, D. F., el año de 1929. Cursó estudios superiores en la Universidad Nacional de México, habiendo terminado la carrera de Ingeniero Civil el año de 1950 obteniendo el título correspondiente en 1952. Desde el año de 1950 presta sus servicios en Petróleos Mexicanos como Geofísico de la Gerencia de Exploración, habiendo desempeñado diferentes trabajos en el campo y en las oficinas actualmente, desarrolla trabajos especiales en el Departamento Central de Geofísica; Profesor de la cátedra de "Métodos Geofísicos de Exploración" en el Instituto Politécnico Nacional y en la Universidad Nacional de México.

Es socio fundador de la Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración y es socio activo de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros donde funge actualmente como Secretario Tesorero.



Estimado Socio:

Agradeceremos a Ud. su cooperación  
enviándonos Artículos para nuestro  
Boletín, o bien Comentarios o Su-  
gestiones que nos permitan seguir  
adelante con nuestra publicación.

# SCHLUMBERGER SURENCO - S. A.

---

AGENCIA EN MEXICO

Av. Morelos 98, Desp. 201

MEXICO 1, D. F.

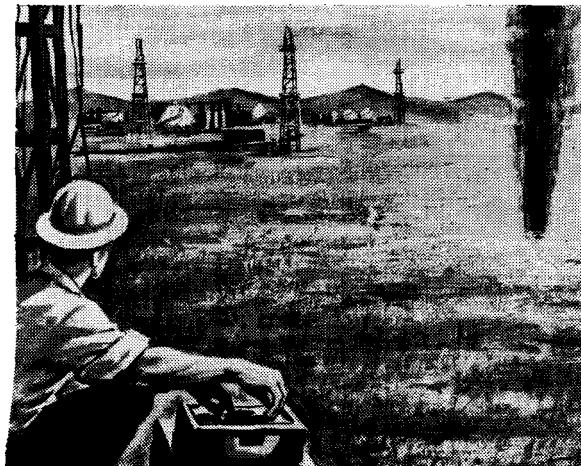
Tels.: 46-85-25 y 46-13-85

# EL ORO NEGRO SE DESCUBRE CON DINAMITA “GEOMEX 60%”

OTRA VALIOSA CONTRIBUCIÓN DE LA CIA. MEXICANA DE EXPLOSIVOS, S. A., AL PROGRESO INDUSTRIAL MEXICANO.

La progresista industria petrolera de México tiene uno de sus más valiosos aliados en los explosivos especiales, como el “Geomex 60%” de la Cía. Mexicana de Explosivos, S. A.

El “Geomex 60%” es una dinamita gelatinosa especialmente preparada para los delicados trabajos de exploración sismológica previa a la perforación del pozo petrolero.



Está especialmente recomendada para trabajos en que se usen barrenos profundos, o cuando el explosivo permanecerá por largo tiempo en el agua, y también para trabajos donde estará sujeta a un prolongado almacenamiento o bajo adversas condiciones de calor o humedad.

Para cada necesidad, hay un explosivo industrial C.M.E. que cumple todos los requisitos de seguridad y eficiencia. Pida informes más detallados a:

CIA. MEXICANA DE EXPLOSIVOS, S. A.

Ave. Juárez 117, 6o. Piso

Méjico 1, D. F.

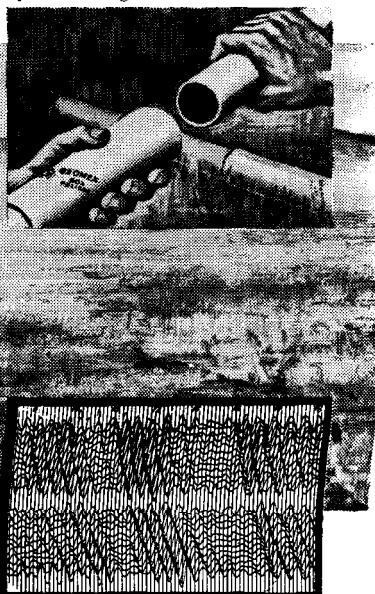


Cosas mejores para vivir mejor... gracias a la Química



Por brechas abiertas en pleno monte, los explosivos de la Cia. Mexicana de Explosivos, llegan hasta el sitio preciso para la exploración sismológica.

La dinamita “Geomex 60%” viene en cartuchos rígidos y resistentes, que facilitan la carga en los barrenos profundos; los cartuchos se unen entre sí cuando se requiere una larga columna continua.



La explosión de cada carga produce vibraciones que el sismógrafo capta y registra, indicando las condiciones geológicas características de los manto petrolíferos.



S O C I O S

\$ 100.00

N O S O C I O S

\$ 150.00



RECIBERA UD. SU VOLUMEN CON  
LOS 4 BOLETINES DEL AÑO 1960,  
ENVASADO EN KERATOL, CON SUS  
CIALES GRABADAS EN ORO

PEDIDOS A LA  
ASOC. MEX. DE GEOF. DE EXPL.

# **GEOEXPLORACIONES, S. A.**

## **S E R V I C I O S :**

**GEOFISICOS**

**GEOLOGICOS**

**RADIACTIVOS**

**TOPOGRAFICOS**

**FOTOGEOLOGICOS**

**AVE. JUAREZ 117 - 502 TEL. 46 - 11 - 81**

**APDO. 20902 MEXICO 1. D. F.**

# **EXPLORACIONES, S. A.**

**AVE. JUAREZ 100**

**DESP. 315**

**TEL. 10 - 15 - 64**

**MEXICO 1. D. F.**

# **PERFORACIONES, S.A.**

**Av. Juárez 119 Desp. 53      Tel. 21-36-42**

**México 1, D.F.**

## **"ROTCENCO"**

**ROTARY ENGINEERING DE MEXICO, S.A.**

**AL SERVICIO DE PETROLEOS MEXICANOS**

**Av. Juárez 119 Desp. 31-32**

**Tels. 46-44-19  
21-58-36**

**México 1, D.F.**

...SISMOLOGIA... GRAVIMETRIA... GEOQUIMICA... MAGNETOMETRIA...

...SUE\*

...PROCESADO DE DATOS

MAE\*\*

AREAS:—Grandes o pequeñas, marinas o terrestres.

PROBLEMAS:—Técnicos u operacionales.

INFORMACION:—Superficial o profunda.

FORMA:—Utilizando los métodos y equipos más modernos compatibles con áreas y presupuestos.

**GEOPHYSICAL**

**SERVICE**

**INCORPORATED**

Exchange Bank Bldg.,  
100 Exchange Park North,  
DALLAS 35, TEXAS.  
Tel. Fleetwood 7-4311

Avenida Juárez No. 119,  
Despacho 42,  
Tels. 46-37-20 - 21-74-67  
MEXICO 1, D. F.

\* Seismic Underwater Exploder

\*\* Multiple Analyzer Eliminator.

**CURSO**  
**DE**  
**SISMOLOGIA APLICADA**

Por el Ing. V. A. OLHOVICH



En las principales librerías

o directamente en la

ASOCIACION MEXICANA DE GEOFISICOS DE EXPLORACION

Av. Juárez 97. Desp. 302.

México 1, D. F.