

# CARTA GEOMAGNETICA DEL PERU - EPOCA: 1961.0

MATEO CASASVERDE R. - ALBERTO A. GIESECKE M.

INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU

V-4  
C28

## 1.—Elementos geomagnéticos.—

Una carta geomagnética que cubra cierta región del globo terrestre, en el presente caso el territorio del Perú, se efectúa sobre la base de un número adecuado y sistemáticamente distribuido, de observaciones de los elementos del campo magnético de la Tierra, correspondiente a todo el territorio y aún a las zonas colindantes de los países vecinos.

La ciencia de Geomagnetismo nos provee, para tales finalidades, de un instrumental preciso para determinar las medidas de aquellos elementos que definen las características del campo geomagnético. Una de las formas de definir este campo (fig. 1) es: mediante la Intensidad Horizontal MO (H) dirigida sobre el meridiano magnético MM', y considerada positiva en cualquier sentido; la Declinación (D) que es el ángulo entre X y H, siendo positiva al Este del meridiano geográfico (NS) y negativa al Oeste; la Inclinação magnética (I), el ángulo formado por H y F, (ésta última la intensidad total del campo), Z es la Intensidad Vertical. Dichos elementos tienen las relaciones fundamentales siguientes, evidentes de la misma fig. 1:

$$H = F \cos I$$

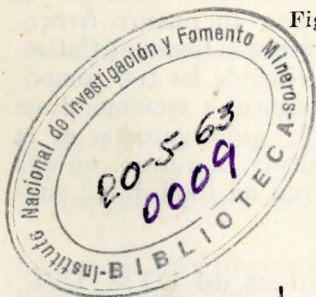
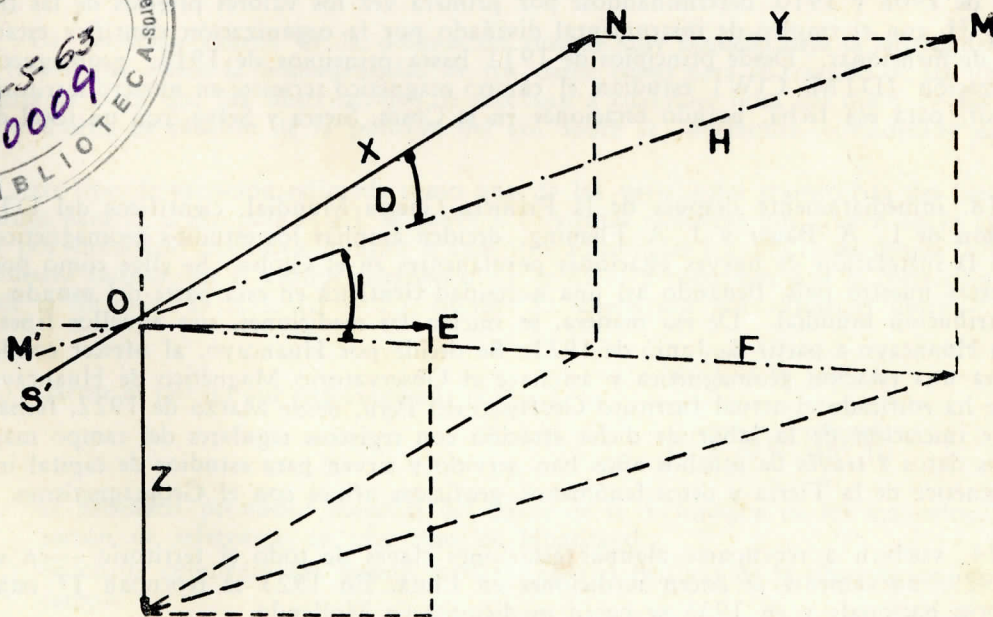
$$Z = H \tan I$$

$$D = \tan^{-1} Y/X$$

$$I = \tan^{-1} Z / \sqrt{X^2 + Y^2}$$

Las unidades empleadas para D, I, son grados y minutos. Para la Intensidad (H, Z, F) se emplea la unidad de una "gamma", que es igual a  $10^{-5}$  gauss, donde 1 gauss en el sistema c.g.s. tiene las dimensiones físicas:  $\text{cm}^{-1/2} \text{gm}^{1/2} \text{seg}^{-1} = \text{dina}^{1/2} \text{cm}^{-1}$ .

Fig. 1.—Elementos del campo magnético terrestre.





## 2.—Algo de historia de las observaciones geomagnéticas en el Perú.

De acuerdo a los datos históricos, las primeras mediciones del campo magnético en sus elementos de inclinación y declinación, fueron realizadas entre 1710 y 1713 por el naturalista francés Feuillée para las localidades de Ilo y Lima. En orden cronológico, mencionaremos las mediciones de la Academia Española, por intermedio de Jorge Juan entre 1736 y 1746 para las localidades de Lima, Tumbes, Piura, únicamente para la declinación. La Condamine, nos proporciona valores de declinación, en 1746, para Lagunas (1) (río Marañón). Entre 1769 y 1825, encontramos datos aislados de inclinación y declinación magnéticas para la Boca de Madera (1781) por la Comisión Portuguesa, para Lima datos de Malespina (1790) y Duperrey (1823) y del Cap. Hall (1821); para Paita de Duperrey (1823); para Ilo de Lastigue (1823); para Huacho y Ancón por el Cap. Hall (1821). En este mismo período, es importante hacer resaltar la abundancia de datos obtenidos por Humboldt para muchos lugares del territorio nacional durante el año de 1802.

De 1825 a 1870 se obtienen también mediciones aisladas de I y D para varias localidades a lo largo de nuestro litoral marítimo, la mayoría de ellas efectuadas por Fitz-Roy (1835); para Lima y Paita en 1836 por éste mismo y por Vaillant (1836), por Du Petit Thouars (1838), por Belcher en 1836; para Andahuailas (Apurímac) y Cuzco por Gibbon en 1851, para algunos lugares cerca al Pará y Marañón, Manaos, Tabatinga por Rouaud y Paz Soldán en 1866; para Mairo (río Pachitea) por Tucker en 1867; para Paucartambo (Cuzco) por Nystrom (1867).

En cuanto a mediciones de la intensidad del campo magnético terrestre, hasta fines del período anterior, se han hecho muy pocas. Los primeros datos corresponden a Lima, efectuadas por Humboldt en 1802, por Duperrey en 1823, Du Petit Thouars y Belcher en 1838. Otros datos corresponden a Paita por Duperrey en 1823 y Du Petit Thouars en el mismo año. Las investigaciones geomagnéticas requieren siempre referencias a los registros de un observatorio, y las unidades empleadas en estos primeros períodos del desarrollo del Geomagnetismo eran valores relativos referidos a dichos observatorios en términos de longitud, masa y tiempo. Precisamente, nuestro país tiene un lugar histórico en este sentido, por haber sido Humboldt quien estableció una unidad de intensidad relativa, comparando los tiempos de oscilación de una aguja magnética particular, tomándose F como unidad, en una estación en la pampa de Micuipampa en Cajamarca sobre el ecuador magnético de aquella época (1802). Esta intensidad así definida, fué empleada por el notable Gauss en su Teoría General del Campo Magnético de la Tierra. Cuando se establecieron las unidades absolutas, aquella establecida por Humboldt era igual a 0.3494 gauss.

El año de 1905, comienza, por decirlo así, una época de oro para el Geomagnetismo en general, con la acumulación sistemática de observaciones sobre los mares y continentes de toda la Superficie Terrestre, labor emprendida por el Departamento de Magnetismo Terrestre de la Institución Carnegie de Washington de los (DTM, CIW) Estados Unidos de N. A.. Como consecuencia, en nuestro territorio se ocuparon varias estaciones en la región de la Selva y en la isla de San Lorenzo, frente al Callao, entre los años de 1908 y 1910, determinándose por primera vez los valores precisos de las tres componentes: D, I y H, con el empleo de instrumental diseñado por la organización científica estadounidense que acabamos de mencionar. Desde principios de 1911 hasta principios de 1913, geomagnetistas de la misma organización (DTM, CIW) estudian el campo magnético terrestre en nuestro territorio con una densidad mayor, para esa fecha, usando estaciones en la Costa, Sierra y Selva, con un total de 52 estaciones.

En 1918, inmediatamente después de la Primera Guerra Mundial, científicos del DTM, CIW, bajo la dirección de L. A. Bauer y J. A. Fleming, deciden ampliar los estudios geomagnéticos en todo el mundo con la instalación de nuevas estaciones permanentes en el Globo. Se elige como posible lugar para una de estas nuestro país, llenando así una necesidad científica en esta parte del mundo como parte de una distribución mundial. De esa manera, se inician las mediciones, con aquellos fines, en Lima en 1918, y en Huancayo a partir de Junio de 1921. Se decide por Huancayo, al ofrecer condiciones inmejorables para una estación geomagnética y así nace el Observatorio Magnético de Huancayo, el pilar sobre el que se ha edificado el actual Instituto Geofísico del Perú, desde Marzo de 1922, fecha que marca la época de iniciación de la labor de dicha estación con registros regulares del campo magnético terrestre, y cuyos datos a través de muchos años han servido y sirven para estudios de capital importancia del campo magnético de la Tierra y otros fenómenos geofísicos afines con el Geomagnetismo.

En 1924, vuelven a reocuparse algunas estaciones claves de todo el territorio —en número de 13—. En 1929, nuevamente se hacen mediciones en Lima. En 1923 se reocupan 17 estaciones, en todo el territorio nacional; y en 1933 se hacen mediciones en Mollendo.



El Servicio de Costas y Geodesia (U.S. Coast and Geodetic Survey), en cooperación con el Instituto Geográfico Militar, con el Departamento de Geología del Ministerio de Fomento, y con el Servicio de Hidrología de la Marina, reocuparon ocho estaciones del DTM y CIW entre 1943 y 1944.

En Julio de 1947, se efectúa la entrega oficial en forma gratuita, del Observatorio Magnético de Huancayo, con todas sus instalaciones, al Gobierno del Perú, por parte del Departamento de Magnetismo Terrestre del Instituto Carnegie de Washington; pasando con el nombre de Instituto Geofísico de Huancayo y como dependencia del Ministerio de Fomento y O.P. A la fecha, debido a la extensa labor desplegada en el campo de la Geofísica, esta misma organización se denomina hoy Instituto Geofísico del Perú. Desde Julio de 1947, la labor geomagnética de nuestro país es mantenida por el Instituto Geofísico del Perú (IGP).

En 1948 y 1950, por recomendación de la Asociación Internacional de Geomagnetismo, el Instituto Geofísico del Perú participa en la obtención de datos de la intensidad horizontal (H) a lo largo de una línea, con 16 estaciones entre el sur de Colombia, Ecuador, Perú y el norte de Chile. Se persigue estudiar la variación diurna peculiar de H en cierto sector de nuestro territorio alrededor del ecuador magnético, línea que cruza aproximadamente el centro de nuestro país, en la época presente. Este proyecto fué ampliado considerablemente, con el empleo de aparatos registradores de los tres elementos: H, D y Z, durante el período conocido como el Año Geofísico Internacional (1957-1959).

En 1953, el Instituto Geofísico, en cooperación con el Servicio Geodésico Interamericano, obtiene nuevamente mediciones geomagnéticas con una red densa de estaciones de campo —en número de 44— en todo el territorio nacional. Con estas mediciones y el estudio de la variación secular con mediciones anteriores, y la estación de referencia de Huancayo, se publicó el Mapa Geomagnético de nuestro país para la época de 1955.0.

Durante el Año Geofísico Internacional, también en cooperación con el Servicio Geodésico Interamericano, se reocuparon algunas estaciones claves; y sobre la base de estas mediciones, se ha confeccionado el mapa adjunto para la época 1961.0. Lógicamente las mediciones anteriores para los criterios de variación secular y la referencia de Huancayo, han servido para este mapa en particular.

3.—El instrumental utilizado en las dos últimas campañas, mencionadas anteriormente, por los autores del presente trapajo, ha sido un equipo standard de campo, de marca norteamericana, Ruska, consistente en las siguientes unidades:

Magnetómetro para mediciones de D y H, Ruska N° 3054.

Inductor Terrestre con Galvanómetro, para medir I, Ruska N° 3049.

Un teodolito para acimut, longitud y latitud, Ruska N° 3054.

4.—Reducción de las Observaciones para la confección del mapa, 1961.0.— Declinación (D).

(a) La variación diurna de la declinación, aunque muy pequeña para la latitud del Perú, no deja de ser un factor que afecta la homogeneidad de los datos como para el trazado de las líneas isogónicas (D = constante), ya que las observaciones se efectúan a cualquier hora del día y de esa manera aquella variación diurna es función de la posición del sol sobre el horizonte, considerada en hora local.

En general, este tipo de variación estimada como una de las variaciones transitorias del campo magnético terrestre, tanto para D, como para H e I, se deben a corrientes eléctricas que fluyen en la atmósfera superior y que por inducción producen campos magnéticos adicionales y como consecuencia la variación diurna. Para nuestra latitud, en el ecuador magnético ( $I = 0^\circ$ ), y próximas a él la corrección por variación se deduce de la fórmula:  $D = L (d - F)$ , donde: D, corrección por variación diurna.

$$L, \text{ factor de latitud que está expresada por: } L = \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{4} \tan^2 I_E}}{\sqrt{1 + \frac{1}{4} \tan^2 I_H}}$$

d. ordenada promedio mensual del valor de la declinación de los magnetogramas de la estación de referencia, en este caso de Huancayo.

F. ordenada promedio del mismo registro para el período de la observación en la estación de campo.



$I_H$  = inclinación en Huancayo.

$I_E$  = inclinación en la estación .

(b) Las observaciones de campo para las distintas estaciones mencionadas en la sección 2, en todo el territorio del país, reducidas a la época de 1955.0 y aquellas del período del Año Geofísico Internacional, estaciones claves, han servido para la determinación de la variación secular de  $D$ , y a su vez cada estación referida a la variación secular, en detalle, de la declinación en la estación permanente de Huancayo. (Ver. Fig. 2)

Se ha determinado, de esa manera, para la reducción de las observaciones para la época de 1961.0, una ecuación cuadrática de la forma:

$$D_2 = D_1 + (\Delta D / \Delta t)_{E_1} \cdot \Delta t + (\Delta^2 D / \Delta t^2)_{H_u} \cdot \overline{\Delta t^2} \dots \dots \dots (I)$$

donde:

$D_2$  es la declinación de la estación para la época  $t_2$ ,

$D_1$  es la declinación de la estación para la época  $t_1$ ,

$(\Delta D / \Delta t)_{E_1}$  es la variación anual, en minutos/año, para la estación y para la época  $t_1$ .

$(\Delta^2 D / \Delta t^2)_{H_u}$  es la "aceleración" de la declinación, en minuto/por año/por año, para la estación de referencia de Huancayo, correspondiente al período que contiene  $\Delta t$ .

$\Delta t = t_2 - t_1$ .

Criterios fundamentales que se han tomado en consideración para el empleo de la ecuación anterior, podemos mencionar las siguientes:

(a) Para el valor de  $D_1$ , punto de partida de la reducción, se ha tomado el valor medio entre 1955.0 y la época siguiente de observación, en el presente caso alrededor de 1958 y 1959.

(b) La variación secular, o anual, de la estación se ha tomado la correspondiente a  $D_1$ .

(c) La aceleración de la declinación en Huancayo, ha sido muy esencial en nuestras reducciones de datos, admitiendo que la aceleración en otras estaciones del territorio nacional es muy próxima o similar a la de Huancayo.

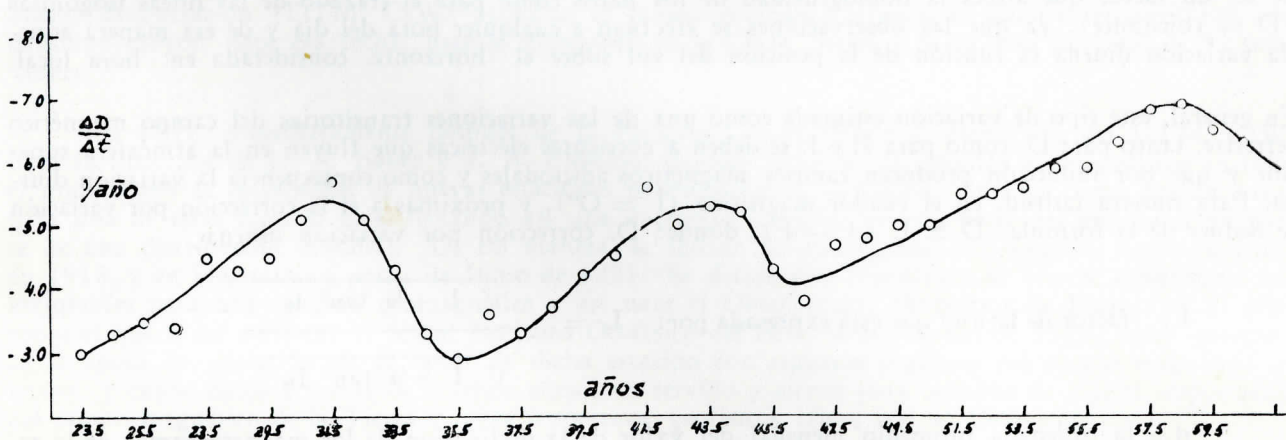


Fig. 2 - Aceleración de la declinación magnética en Huancayo  
Cinco días tranquilos

(d) La variación anual, representada por las isóporas ( $\Delta D/\Delta t = \text{constante}$ ), en las otras estaciones no claves, han sido determinadas gráficamente de la variación anual determinada para las estaciones claves. La Tabla 1 muestra los valores determinados para las estaciones claves.

(e) La reducción se ha hecho año por año, debido al factor de la aceleración anual registrada en Huancayo. (Véase Fig. 2).

#### Intensidad Horizontal (H).—

Una de las características más resaltantes del campo magnético terrestre en nuestro territorio, es como veremos más adelante, el efecto del fenómeno llamado Electrochorro Ecuatorial. Para la reducción de los datos de H, para fines del mapa geomagnético, es muy importante tomar en consideración este fenómeno, además de la variación secular. Las mediciones de H obtenidas durante el período del Año Geofísico Internacional y en 1948 y 1950 para los estudios del Electrochorro Ecuatorial, nos servirán de referencia para efectuar las correcciones necesarias con los criterios siguientes:

(a) Se ha optado por considerar como el valor de H para el mapa geomagnético, aquel valor medio mensual de cada estación, sin necesidad de una corrección por variación diurna, valor medio determinado con relación a los registros de Huancayo.

(b) El efecto máximo del Electrochorro en la componente horizontal es a lo largo del ecuador magnético.

(c) Este efecto disminuye en una cantidad establecida por los estudios mencionados más arriba, hacia el sur y hacia el norte del ecuador magnético.

(d) Aquel efecto cuantitativo para cada lugar de nuestro territorio, se puede inferir directamente de acuerdo a su latitud magnética, de los datos de Huancayo, para días magnéticamente tranquilos, puesto que la distribución de tal efecto está referida y normalizada con los valores de Huancayo.

(e) La variación secular de H, ó variación anual como también se le llama, es en nuestro territorio una variación lineal, por lo menos para el período que se dispone de datos.

Entonces, teniendo en consideración la variación diurna en Huancayo, para el mismo período mensual de la observación y la distribución del efecto del Electrochorro Ecuatorial referida a Huancayo, se ha encontrado la siguiente fórmula que nos ha servido para las reducciones correspondientes a H:

$$H = H_E + K \Delta H + (\Delta H/\Delta t) \cdot \Delta t \dots\dots\dots(2)$$

donde:

H, H final para el período  $t_2$  del mapa.

$H_E$ , intensidad horizontal observada en la estación E,

K, coeficiente que llamaremos "coeficiente electro-chorro" que resulta de  $A_1/A_2$

$\Delta H$ , diferencia de la media de H para Huancayo y H observado en la estación,

$\Delta H/\Delta t$ , variación anual media de H en gamas por año.

$\Delta t = t_2 - t_1$

$A_1$ , amplitud total de variación diurna de H en Huancayo,

$A_2$ , amplitud total de variación diurna de H en la estación E,

Los valores reducidos de H para las estaciones claves se muestran en la Tabla 1.

#### Inclinación (I).—

De las mediciones obtenidas para la Inclinación durante las dos últimas campañas: 1953, 1958-1959, se deduce que la variación anual de la inclinación en todo el territorio muestra una cantidad muy pequeña, despreciable para la aproximación utilizada en el trazado de las "isóclinas" del mapa ( $I = \text{constante}$ ). A este enunciado corrobora la variación secular de la componente vertical (Z) de los registros de Huancayo, donde a partir de 1953:  $\Delta Z/\Delta t = \text{constante}$ . Sin embargo, por vía de información, ya se nota que  $\Delta Z/\Delta t$  han comenzado a aumentar ligerameste a partir de 1962.



Los datos reducidos de la inclinación magnética se muestran en la Tabla 1, en igual forma que para los otros dos elementos anteriormente expuestos.

TABLA 1.— Estaciones claves ocupadas: 1958 — 1959 con datos reducidos para época 1961.0

NOMBRE	COORD. GEOGRAFICAS		D (Este)	I	H (gammas)
	Q, Sur	$\lambda$ , Oeste			
Iquitos	3° 45.4	73° 14.9	2° 04.4	18° 21.6	29680
Paita	5 05.1	81 07.2	6 24.6	12 52.7	30273
Pacasmayo	7 24.5	79 34.0	6 06.0	8 53.8	29771
Santa	9 58.0	78 24.8	5 41.3	6 56.6	29394
Pucallpa	8° 22.1	74 32.0	3 48.7	9 18.2	29012
Huancayo	12 02.7	75 20.4	6 03.8	2 04.0	28427
Cuzco	13 31.1	71 59.2	3 37.7	0 01.0	27837
Ica	14 04.0	75 45.0	5 36.0	-1 48.4	27855
Puquio	14 40.9	74 07.6	5 06.1	-2 41.4	27706
Juliaca	15 29.4	70 07.6	2 37.8	-2 57.4	26953
Tacna	18 01.2	70 14.0	3 14.9	-7 37.6	26143

#### 5.—Descripción General del Campo Magnético Terrestre en el Perú.

Refiriéndonos a la carta geomagnética adjunta, época 1961.0, podemos intentar en dar una relativa y elemental descripción del campo magnético en nuestro país, tal como se le mide en superficie. El campo geomagnético es en sí muy complejo y aún con muchos problemas por resolver, esencialmente con relación a su origen.

La carta muestra los siguientes elementos: las isógonas ( $D = \text{const.}$ ), representadas por las líneas de color rojo, de grado en grado; las isóclinas ( $I = \text{const.}$ ) de color azul, cada 5 grados; las isodinámicas ( $H = \text{const.}$ ), para la intensidad horizontal, con líneas rayadas de color verde, cada 500 gammas; y las isóporas ( $\Delta D/\Delta t = \text{const.}$ ) para la declinación únicamente, con líneas rayadas de color granate, para cada 0.5 minutos por año.

Tal como nos adelantamos, en la sección 4, reducción de H, una de las características más saltantes de la fisonomía magnética de nuestro territorio con relación a otras latitudes del globo terrestre, es la presencia del ecuador magnético representado por la isóclina  $I = 0^{\circ}$  (Mapa de la época 1961.0) que cruza el Perú entrando del Pacífico por muy cerca de Cañete, siguiendo por Ayacucho, Cuzco, para luego salir en territorio brasilero a la altura de la latitud  $13.5^{\circ}$  S. Recientes investigaciones han explicado que la variación diurna anormal de la intensidad horizontal y la intensidad vertical en la zona del ecuador magnético, se debe a la presencia de una corriente eléctrica que fluye de Oeste a Este, a una altura aproximada de 100 km., con un ancho principal aproximado de 660 km., con centro sobre el ecuador magnético. La intensidad de esta corriente es función esencial de la altura del sol, siendo por lo tanto incrementada en las horas del medio día.

La inclinación magnética aumenta con signos contrarios a medida que uno se aleja hacia el sur o hacia el norte del ecuador magnético registrándose hasta  $+24^{\circ}$  en el norte del Depto. de Loreto y de  $-7^{\circ}$  en Tacna.

Considerando la Tierra como un dipolo ideal —porque en realidad la tierra es un dipolo no homogéneo— se pueden determinar lo que se llaman las coordenadas geomagnéticas con referencia a los polos y ecuador geomagnéticos. De esa manera, el ecuador geomagnético, también cruza nuestro país a unos 2° de latitud al norte del ecuador magnético.

En cuanto a la declinación, son todas al Este del meridiano geográfico, desde aproximadamente 1°E en el Este del país, hasta unos 6°E en el litoral marítimo.

En cuanto a la intensidad horizontal, encontramos desde aproximadamente 30500 gamas en el extremo norte hasta unos 26,100 gamas en el extremo sur.

#### 6.—Cómo emplear la carta geomagnética.

Intentamos que la presente carta geomagnética sea útil para un período aproximado de cinco años.

En cuanto a la componente horizontal, la lectura directa con las interpolaciones respectivas, darán los valores de H para un lugar y la época correspondiente a la carta. Para épocas futuras, la aplicación de la corrección por variación secular, dará resultados bastante aproximados para cada lugar. Este factor de corrección consiste en  $\Delta H/\Delta t = -60$  gamas por año.

Para la inclinación, la variación secular es relativamente despreciable incluyendo el período de cinco años después de 1961.0.

En la obtención de lecturas para la declinación, para una época y un lugar dados, es importante tener presente las isóporas de cada lugar  $(\Delta D/\Delta t)_E$ .

y la aceleración anual  $(\Delta^2 D/\Delta t^2)_{Hu}$  de Huancayo. La ecuación (1) nos sirve para estas determinaciones con las provisiones siguientes: emplear  $\Delta^2 D/\Delta t^2 = + 0.4$  min./año con t en años, hasta aproximadamente 1962.5 y de aquí en adelante usar el valor para dicha aceleración hasta 1966.0, igual a  $- 0.4$  min./año.

La aplicación de las correcciones por variación secular y aceleración anual —esta última en el caso de la declinación— han sido estimadas y constituyen resultados de otros estudios actualmente en preparación por los mismos autores.



BIBLIOGRAFIA.—

- (1) MANUEL ROUAUD y PAZ SOLDAN: Ensayo de una Teoría del Magnetismo Terrestre en el Perú. — Imprenta "Nacional", Lima, 1869.
- (2) SCOTT FORBUSH, M. CASAVARDE: "Equatorial Electrojet in Perú", Carnegie Institution of Washington Publication N° 620, Washington, D. C., 1961.
- (3) M. CASAVARDE, R. "Introduction to Geomagnetism: The Equatorial Electrojet", American Journal of Physics, Vol. 29, Nov. 1961.
- (4) M. CASAVARDE y ALBERTO GIESECKE: "La Variación Secular del Campo Magnético Terrestre en el Perú". Por publicarse.
- (5) L. A. BAUER: "Land Magnetic Observations 1905-1910", Public. N° 175, Carnegie Inst. of Washington, 1912.
- (6) L. A. BAUER, et al.: "Ocean Magnetic Observations": 1905-1916, Carnegie Inst. of Washington, 1917.
- (7) L. A. BAUER, J. A. FLEMING: "Land Magnetic Observations 1911-1913", Vol II Carnegie Inst. of Washington (CIW), 1915.
- (8) L. A. BAUER et al: "Land Magnetic Observations 1914-1920", Pub. N° 175, Vol. IV, CIW, 1921.
- (9) H. W. FISK: "Land Magnetic and Electrical Observations, 1918-1926". Pub. 175, CIW, 1927, Vol. VI.
- (10) J. P. AULT, et al: "Ocean, Magnetic and Electrical Observ. 1915—1921". Pub. 175, Vol. V, CIW, 1926.
- (11) W. F. WALLIS: "Land and Ocean Magnetic Observations, 1927-1944", Pub. 175, Vol. VIII, CIW, 1947.
- (12) U. S. Coast and Geodetic Survey: "Magnetic Observations in the American Republic 1941-1944". U.S.C.
- (13) Carta Geomagnética del Perú a 1955.0: Instituto Geofísico de Huancayo. Publicación Especial N° 1. and G.S., Serial 677, 1946.