

2
29/11/85

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



**ESTUDIO PALEOMAGNETICO Y MAGNETOMETRICO EN EL AREA
DE AGUA DE OBISPO-TIERRA COLORADA ESTADO DE GUERRERO**

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO GEOFISICO

P r e s e n t a n :

DAMASO FRANCISCO CONTRERAS TEBAR

LUIS C. RAMIREZ CRUZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

RESUMEN

I. INTRODUCCION	1
II. PALEOMAGNETISMO Y MAGNETISMO DE ROCAS	3
II.1 Campo Geomagnético	3
II.1.a Campo Principal	6
II.1.b Origen del Campo Principal	11
II.1.c Variaciones Seculares	12
II.1.d El Campo Magnético Externo	15
II.1.e Cambios de Polaridad del Campo Magnético Terrestre	16
II.2 Anomalías Magnéticas Locales	18
II.3 Magnetismo de Rocas y Mineraleas	19
II.3.a Susceptibilidad Magnética de Rocas y Mineraleas	22
II.4 Paleomagnetismo	23
II.4.a Síntesis Histórica del Paleomagnetismo .	25
II.4.b Magnetismo Remanente Natural	26
III. AREA DE ESTUDIO	29
III.1 Selección de la Zona	29
III.1.a Localización y Vías de Comunicación ...	31
III.1.b Población	31
III.1.c Clima y Vegetación	32
III.2 Geología Regional	33
III.2.a Fisiografía	33
III.2.b Geomorfología	36
III.2.c Estratigrafía	36

III.2.d	Descripción de las Formaciones Estudiadas	37
IV.	ANÁLISIS E INTERPRETACION MAGNETOMETRICA	39
IV.1	Interpretación Magnética	39
IV.1.a	Análisis de la Calidad de los Datos Magnéticos	42
IV.1.b	Separación de Efectos Regionales	42
IV.1.c	Análisis de la Anomalía Residual	45
IV.2	Ambigüedad en la Interpretación	47
IV.3	Descripción y Análisis de la Anomalía Estudiada	49
IV.4	Procesado de la Anomalía	51
V.	ESTUDIO PALEOMAGNETICO Y DE MAGNETISMO DE ROCAS ...	63
V.1	Trabajo de Campo	63
V.2	Trabajo de Laboratorio	70
V.2.a	Preparación de las Muestras	70
V.2.b	Análisis de la Estabilidad del MRN	70
V.2.c	Medición del Magnetismo Remanente Natural	72
V.2.d	Desmagnetización por Campos Magnéticos Alternos Decrecientes	72
V.2.e	Desmagnetización Térmica	74
V.2.f	Interpretación Paleomagnética	75
VI.	RESULTADOS Y DISCUSION	79
VII.	CONCLUSIONES	122
	BIBLIOGRAFIA	125

R E S U M E N

Se reportan los resultados de un estudio paleomagnético y magnetométrico de la zona de Agua de Obispo - Tierra Colorada, Estado de Guerrero. En esta zona se han observado anomalías magnéticas intensas de carácter dipolar (amplitud 1500 gamas, máximo-mínimo), que podrían estar asociadas a cuerpos de interés económico (mineralización de fierro).

Para el estudio paleomagnético se colectaron 91 muestras de 10 sitios de la Formación Alquitrán y 16 muestras de dos sitios de la Formación Agua de Obispo. En el laboratorio se midió la magnetización remanente natural (MRR) con un magnetómetro discriminador de flujo y con un magnetómetro criogénico.

La estabilidad y composición vectorial de las magnetizaciones se analizaron con desmagnetización por campos magnéticos alternos decrecientes (CMAD) y por altas temperaturas (térmica). Las muestras estudiadas mostraron coercitividades menores o iguales a 1000 Oersted , que son características de la serie de titanomagnetitas. En las muestras de la Formación Alquitrán, los minerales magnéticos son de la serie titanomagnetitas con tamaños de grano fino, que presentan intensidades altas de magnetización. Las magnetizaciones remanentes para la mayoría de los sitios presentan polaridad reversa o intermedia. La polaridad reversa (declinaciones al sur e inclinaciones arriba de la horizontal) podría explicar la anomalía

I.- INTRODUCCION

El Paleomagnetismo es una rama de la geofísica que utiliza una de las propiedades físicas de la Tierra, como es el Campo Magnético, para realizar una reconstrucción de la historia de ésta.

A través de las últimas décadas ha cobrado gran importancia dentro de los estudios geológicos y geofísicos, ya que ha sido una herramienta muy importante para resolver problemas que antes no tenían una solución satisfactoria.

Dentro de las aplicaciones más conocidas se tienen aquellas relacionadas con las teorías sobre el origen y evolución del planeta, Teoría de la Tectónica de Placas, etc. Además su campo de aplicación se ha extendido a otras áreas tales como: arqueomagnetismo, estratigrafía, interpretación magnetométrica, etc.

En el presente trabajo se expone primeramente un marco general de lo que es el Campo Geomagnético, el magnetismo de rocas, así como las bases y evolución del Paleomagnetismo.

Más adelante se explica el porque fue seleccionada la zona de estudio y las características de ésta. como su clima, vegetación, geología y su comportamiento magnético (muy intenso).

Después se presentan las técnicas de interpretación magnetométrica y paleomagnética que fueron utilizadas en el estudio.

El objetivo de esta tesis fue estudiar el magnetismo

remanente natural (MRN) de las rocas y su influencia en las anomalías magnéticas, para ello se realizó un muestreo en la zona de Agua de Obispo - Tierra Colorada en el que se colectaron muestras de la Formación Agua de Obispo y de la Formación Alquitrán.

En el laboratorio se hizo el análisis de los especímenes obtenidos de las muestras, utilizando las técnicas del Paleomagnetismo, con las que se midió su MRN y se hizo la correspondiente interpretación.

También se realizó un estudio magnetométrico del área de interés, analizando la anomalía principal (más intensa), para esto se digitizaron los datos aeromagnéticos cada 200 metros, formando una malla regular de 8 x 9.6 Km.

Para interpretar los datos magnéticos se hizo un modelo bidimensional por el método de Talwani, así como continuaciones ascendentes, reducción al polo y primera y segunda derivada.

En la interpretación magnetométrica generalmente no se toma en cuenta el MRN de las rocas, pues sólo se considera la magnetización inducida; esto puede traer como consecuencia, algunos errores en la interpretación de los datos, es por ello que en este estudio se muestra como el Paleomagnetismo puede ser una buena herramienta dentro de la interpretación de datos magnetométricos, pues existen casos en los que no es posible tener una buena interpretación considerando sólo el magnetismo inducido.

II.- PALEOMAGNETISMO Y MAGNETISMO DE ROCAS.

II.1 Campo Geomagnético.-

Los estudios del campo magnético terrestre han sido realizados desde la antigüedad, los chinos inventaron una brújula sencilla en primer siglo después de Cristo y observaron que tal brújula apuntaba aproximadamente en la dirección Norte - Sur. Pero no fue sino hasta 1600 D.C., cuando William Gilbert mostró que el comportamiento de una brújula en la superficie terrestre es muy similar al de una aguja de hierro colocada sobre la superficie de una esfera de magnetita, las mediciones sistemáticas del Campo Magnético Terrestre empezaron a realizarse durante el comienzo del siglo XIX, hace menos de 200 años. Las mediciones han sido hechas en el mar y en tierra mediante los observatorios y las prospecciones magnéticas, con el fin de establecer las variaciones en el campo. En comparación con otros datos geofísicos relacionados con la Tierra, la cantidad de información acumulada para el campo geomagnético es relativamente enorme.

Gauss fue el primero en describir la distribución del Campo Magnético Terrestre en una forma matemática. Gauss estableció conceptos físicos tales como " fuerza " y " campo de fuerza " en base a un esquema matemático que hoy se incluye en la Teoría del Potencial. Como resultado de sus estudios llegó a la importante conclusión de que más del 97% de la fuerza magnética observada en la superficie de la Tierra, se origina en

su interior y sólo una parte muy pequeña del campo puede ser atribuida a fuentes externas.

El Campo Magnético Terrestre puede ser descrito mediante un análisis de Harmónicos Esféricos. A partir de este análisis se ha establecido que el campo está compuesto de tres partes:

- a) El Campo Principal o Dipolar, el cual es de origen interno
- b) El Campo No Dipolar de origen interno
- c) El Campo No Dipolar de origen externo

El análisis matemático del campo magnético terrestre, pone de manifiesto una de sus características más notables, su comportamiento dipolar, esto es, el campo que se produciría sobre la superficie terrestre por efectos de una barra fuertemente imantada situada en el centro de la Tierra y alineada según su eje de rotación.

En un punto cualquiera de la superficie terrestre, el campo que se obtiene al restar del campo magnético terrestre observado el campo teórico del dipolo ideal correspondiente a dicho lugar, recibe el nombre de Campo No Dipolar.

El Campo Externo o No Dipolar de origen externo, es una pequeña fracción del campo total que varía rápidamente y el cual se origina fuera de la Tierra.

En la figura 1 se muestra la distribución del Campo Magnético Terrestre.

II.1.a El Campo Principal.-

Principales Características del Campo Geomagnético.

Si la aguja de un compás magnético o de una brújula es colocada horizontalmente, de tal manera que oscile libremente, ésta apunta en una dirección definida en cada lugar y su desviación del Norte Geográfico es lo que se denomina Declinación (D). En estudios geomagnéticos D es positiva o negativa de acuerdo a si su desviación es al Este o al Oeste del Norte Geográfico. En estudios paleomagnéticos D es medida hacia el Este en el sentido de las manecillas del reloj a partir del presente Norte Geográfico, por lo tanto D toma valores entre los 0° y los 360° .

La dirección a la cual la aguja apunta, es llamada Norte Magnético y el plano vertical a lo largo de esta dirección es llamado Meridiano Magnético.

Una aguja balanceada y desmagnetizada, de tal manera que pueda oscilar libremente en el plano del Meridiano Magnético es denominada aguja buzante o inclinómetro. Después de magnetizarse la aguja toma una posición inclinada con respecto al eje horizontal mediante un ángulo o buzamiento que es lo que se conoce como Inclinación (I). La inclinación es positiva cuando la aguja apunta hacia abajo, tal como lo hace en el Hemisferio Norte o Septentrional, o negativa cuando apunta hacia arriba, si se encontrara en el Hemisferio Sur o Austral. La Inclinación toma valores entre 0° y 90° positivos o negativos según sea el caso.

Al colocar la aguja en algún sitio sobre la Tierra, ésta se orientará en determinada dirección. La magnitud (F) del campo magnético en ese punto, su declinación y su inclinación, definen al campo magnético . La magnitud F del campo magnético la podemos

dividir en dos componentes, ambas se encuentran sobre el meridiano magnético y son:

La componente vertical Z, por convención positiva hacia abajo. La componente horizontal H que es la intersección del Meridiano Magnético con el plano formado por el Norte y el Este geográficos. H es positiva y a su vez en otras dos componentes, X e Y, consideradas positivas hacia el Norte y hacia el Este respectivamente. Todas las componentes se muestran en la figura 2.

Las siguientes expresiones nos relacionan los elementos magnéticos representados en la figura 2.

$$F^2 = H^2 + Z^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$$

$$H = F \cos (I) ; \quad Z = F \operatorname{Sen} (I) ;$$

$$X = H \cos (D) ; \quad Y = H \operatorname{Sen} (D) ;$$

$$\operatorname{Tan} (I) = Z/H ; \quad \operatorname{Tan} (D) = Y/X ;$$

Las líneas de igual inclinación son llamadas isoclínicas; líneas de igual declinación son llamadas isogónicas; líneas de iguales valores de F, H o Z son llamadas isodinámicas. La isoclina cero es el llamado ecuador magnético y es una línea ondulante que circunda la Tierra. Dicha línea se encuentra cerca del ecuador geográfico. Estas líneas en conjunto, cuando son graficadas sobre un mapa forman las Cartas Isomagnéticas. Estas cartas muestran las variaciones en el campo magnético sobre la superficie terrestre. Por extraño que parezca, el campo magnético refleja poco de la variación superficial en

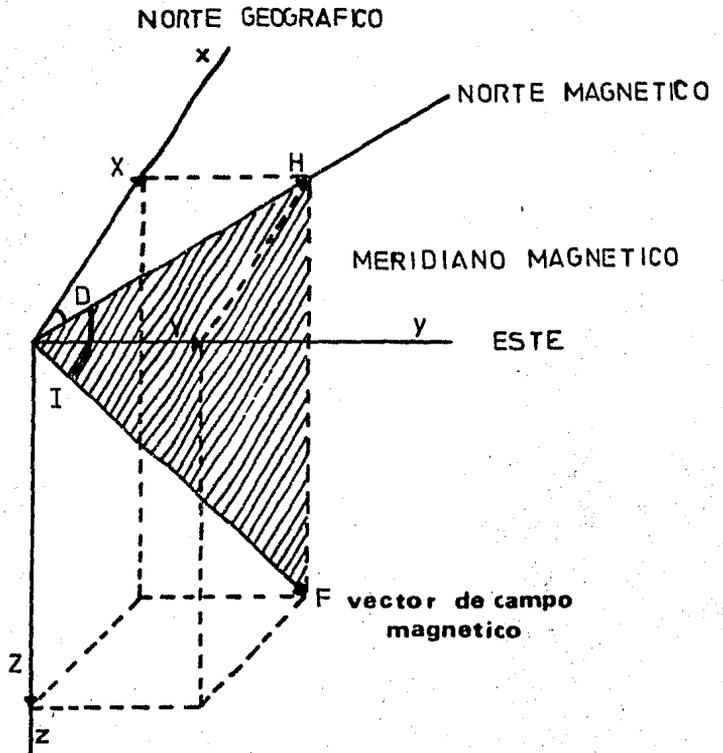


FIG. 2
ELEMENTOS DEL
CAMPO GEOMAGNETICO

magnética observada que es de forma dipolar invertida.

La anomalía estudiada (la más intensa), presenta una forma dipolar invertida y está en la zona de Rincón de la Vía. Los datos aeromagnéticos se digitizaron cada 200 metros para conformar una malla regular de 8 x 9.6 Km. Estos datos se emplearon para generar mapas de continuaciones analíticas, primera y segunda derivada. Datos de un perfil que cruza el máximo y mínimo de la anomalía se interpretaron usando el algoritmo de Talwani. Para el modelo se uso un cuerpo tabular con un ancho de 3 Km situado a una profundidad de 2 Km.

Debido al caracter dipolar invertido de la anomalía, no es posible usar en el modelado solo la magnetización inducida (la cual tiene la polaridad del campo magnético actual), por lo que se requiere considerar una magnetización remanente con polaridad reversa.

Es por esto que el Paleomagnetismo constituye una herramienta útil en la interpretación de datos magnetométricos, pues existen casos en los que no es posible tener una buena interpretación considerando sólo el magnetismo inducido.

la Geología y en la Geografía, tales como alineamientos y rasgos montañosos, cinturones sísmicos y crestas submarinas. Esto indica que la fuente principal del campo magnético terrestre está en el interior de la Tierra.

El campo magnético terrestre se asemeja a un dipolo cuyos polos magnéticos Norte y Sur, se encuentran aproximadamente localizados a $78\frac{1}{2}^{\circ}\text{N } 69^{\circ}\text{W}$; y $78\frac{1}{2}^{\circ}\text{S } 111^{\circ}\text{E}$. El eje de este dipolo se encuentra inclinado con respecto al eje de rotación $11\frac{1}{2}^{\circ}$ y los puntos en los cuales el eje dipolar corta a la superficie de la Tierra se denominan polos geomagnéticos. El dipolo geomagnético está en el centro de la Tierra, por lo cual se dice que es geocéntrico, aunque no coincide exactamente a lo largo del eje de rotación, por lo que se dice que no es un dipolo axial. Ya que este dipolo es una aproximación al campo magnético total de la Tierra, sus polos no coinciden con los puntos en la superficie donde la aguja búzante está vertical, donde $H = 0$, conocidos como los polos de máxima inclinación, que están localizados actualmente a $75^{\circ}\text{N } 101^{\circ}\text{W}$ el norte y a $67^{\circ}\text{S } 143^{\circ}\text{E}$ el sur.

La magnitud de F en los polos magnéticos es de 0.6 Oersted en el Norte y 0.7 en el Sur. El mínimo valor, que es cerca de 0.25 Oersted, se encuentra en el Pacífico y en sólo unos pocos lugares F es mayor que 3 Oersted, debido a anomalías magnéticas cerca de la superficie.

II.1.b Origen del Campo Principal.-

Las teorías con mayor aceptación con relación al origen del Campo Magnético Terrestre principal, sugieren que el mismo está asociado a la presencia de corrientes eléctricas en el núcleo de la Tierra, generadas en grandes masas de material conductor puestas en movimiento por corrientes de convección u otro mecanismo. La teoría actual es que el campo principal es causado por corrientes eléctricas circulando en la parte externa del núcleo (que tiene un comportamiento semejante al de un fluido según evidencias sísmicas), el cual se extiende desde un radio de 1300 Km a 3500 Km. Por diversas razones se asume que el núcleo de la Tierra está compuesto de Hierro y Níquel, ambos buenos conductores eléctricos. Aun si el material interno fuera no conductor, las presiones en el núcleo (10^6 bars) podrían expulsar algunos electrones libres de suficiente conductividad. Cualquiera que sean los materiales constituyentes del núcleo, la fuente magnética es del tipo de un dínamo autoexcitado, en el cual un fluido altamente conductivo lo mueve en un complejo movimiento mecánico, mientras que las corrientes eléctricas posiblemente originadas por variaciones químicas o térmicas, fluyen a través de él. La combinación de movimiento y corrientes crea un campo magnético.

II.1.c Variaciones Seculares.-

Como resultado de cerca de 400 años de estudios, se ha establecido que el campo magnético terrestre está lejos de ser constante, un claro ejemplo de esto se puede ver en los registros de inclinación y declinación de Londres y París desde 1580 aproximadamente, donde la inclinación ha cambiado unos 10° y la declinación unos 35° . En la figura 3 se muestra el desplazamiento secular de la declinación e inclinación magnéticas medidas en Londres, Boston y Baltimore.

La variación secular es una variación temporal del campo magnético terrestre, la cual cambia durante décadas o siglos. Estas variaciones se observan por pequeñas desviaciones en la inclinación, declinación y en las distintas componentes de la intensidad. La magnitud del cambio varía con el tiempo. Estas variaciones seculares se ponen de manifiesto en los mapas isopóricos, pues las líneas de igual cambio se denominan isóporas.

Las medidas realizadas de la intensidad de la Tierra durante los últimos 100 años indican que el momento magnético total está decreciendo a la velocidad de $1/500$ de su valor total por año. Si este régimen continúa el momento será la mitad del actual hacia el año 3000. No se puede saber si este cambio continuará en el mismo sentido o es una simple manifestación de un cambio cíclico de gran período en el magnetismo terrestre.

Un cambio secular más claro, es el de la revolución aparente de los polos magnéticos en torno al eje de rotación.

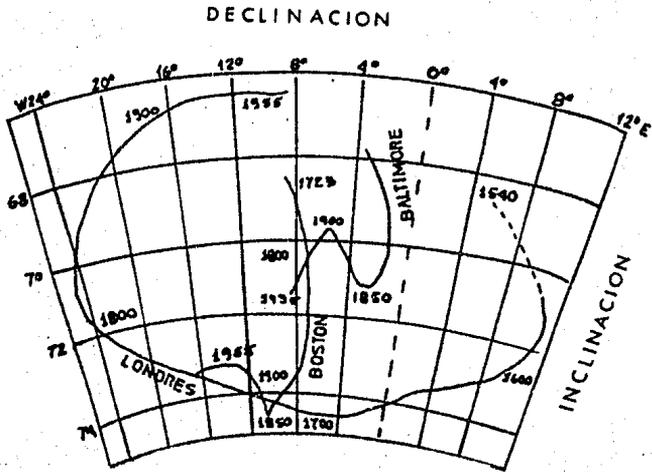


Fig 3

Variación Secular de
declinación e Inclinação
magnética

La comparación hecha de las observaciones realizadas por diferentes observatorios demuestran que tal precesión es incapaz de explicar todos los datos. En todos los casos las variaciones seculares parecen ser más bien regionales que planetarias, y aunque sus fuentes no se conocen, se piensa que sean internas, posiblemente relacionadas con los cambios en las corrientes de convección en el núcleo, en la transición manto-núcleo y en la velocidad rotacional de la Tierra.

II.1.d El Campo Magnético Externo.-

La mayor parte del 1% restante del campo magnético terrestre, se origina fuera de la Tierra y parece estar asociado con corrientes eléctricas en las capas ionizadas de la estratósfera. Las variaciones en el tiempo son mucho más rápidas que las del campo interno.

- Un ciclo de 11 años de duración, en el cual varía tanto la intensidad vertical como la horizontal, y parece estar asociado con los períodos de mayor frecuencia de las manchas solares.
- Variaciones Solares Diurnas, con un período de 24 horas y un rango de 24 gamas; varían con la latitud y según la estación del año y son probablemente controladas por la acción del sol sobre las corrientes de la ionósfera.
- Variaciones Lunares Diurnas, con un período de 25 horas y una amplitud de cerca de 2 gamas; varían ciclicamente a lo largo del mes y parecen estar asociadas mediante una interacción Luna-Ionósfera.
- Tormentas Magnéticas y Perturbaciones Transitorias, con amplitudes tan grandes como 1000 gamas en la mayoría de las latitudes y aún mayores en las regiones polares, donde éstas están generalmente asociadas con las auroras boreales. Aunque de carácter errático, a menudo ocurren en intervalos de cerca de 27 días, cuyo período se puede correlacionar con las manchas solares. En la fase más alta de una tormenta magnética, la prospección magnética se vuelve impráctica.

II.1.e Cambios de Polaridad del Campo Magnético Terrestre.-

Una de las características del campo magnético terrestre, que se ha detectado mediante los estudios paleomagnéticos, es la propiedad de cambiar la polaridad con el tiempo. Esta característica fue descubierta al encontrarse que la magnetización remanente natural de ciertas rocas de la corteza terrestre tienen aproximadamente la misma dirección que el campo magnético terrestre actual en la zona de afloramiento, pero en sentido contrario.

Mediante algunos estudios se ha determinado que: a) Las formaciones geológicas que tienen remanencia de polaridad reversa están en igual proporción que aquellas de polaridad normal. b) Las rocas de la misma edad geológica, provenientes de distintos lugares geográficos, de distintos orígenes, de diferente litología y constitución química, presentan igual polaridad de su remanencia magnética. c) Las rocas calentadas por haber estado en contacto con efusiones o intrusiones de cuerpos ígneos presentan una magnetización remanente de igual polaridad que la de dichos cuerpos.

Se ha acordado en denominar intervalo de transición al período durante el cual el campo magnético terrestre cambia su polaridad; el mismo está determinado en la práctica por las diferentes magnetizaciones remanentes naturales de las rocas, cuyas direcciones son intermedias entre aquellas correspondientes al estado normal y reverso. Mediante estudios paleomagnéticos se ha determinado que el campo magnético terrestre suele presentar cambios reversibles en sus componentes que no

llegan a ser una verdadera reversión en su polaridad. Estos cambios reversibles se conocen con el nombre de excursiones. También se ha determinado que durante el proceso de cambio de polaridad, la intensidad del campo magnético terrestre disminuye.

Se han propuesto diferentes teorías y modelos para tratar de explicar el fenómeno de reversión del campo magnético terrestre, pero hasta la fecha se desconoce cuál puede ser el origen de estas reversiones magnéticas.

II.2 Anomalías Magnéticas Locales.-

Se consideran como anomalías magnéticas regionales las desviaciones localizadas en el campo magnético terrestre respecto a la distribución que habría en el caso de que el campo magnético terrestre fuese originado por un dipolo. Estas anomalías alcanzan máximos del orden de 10,000 gamas, es decir, la tercera parte de la intensidad en el ecuador. Estas anomalías constituyen lo que se llama el campo no dipolar interno que es irregular. Este es el campo que origina la mayoría de las irregularidades en las cartas isomagnéticas. El campo no dipolar se superpone al campo dipolar, y si es último se resta matemáticamente del campo total nos queda sólo el campo no-dipolar.

Estas anomalías son ocasionalmente grandes, que llegan a doblar el campo principal local. Las fuentes de éstas anomalías difícilmente son muy profundas, ya que las temperaturas en el fondo de la corteza se encuentran cercanas a la temperatura Curie. Por lo tanto estas anomalías se encuentran asociadas con rasgos superficiales, y son el resultado de las variaciones en el contenido de mineral magnético en las rocas superficiales. Las rocas pues, se magnetizan debido a su contenido de minerales magnéticos, entre los cuales están la Magnetita, la Hematita, la Ilmenita, la Pirrotita, la Maghematita. Los otros minerales que constituyen a las rocas presentan comportamiento diamagnético o paramagnético. Para fines prácticos, se puede decir que las rocas son magnetizables si contienen Magnetita.

II.3 Magnetismo de Rocas y Minerales.-

Las anomalías magnéticas son causadas por la cantidad de minerales magnéticos contenidos en las rocas. Así, las rocas ígneas son mucho más magnéticas que las sedimentarias.

Todos los materiales pueden ser clasificados en tres grupos de acuerdo con sus propiedades magnéticas, que son: Diamagnéticos, Paramagnéticos y Ferromagnéticos, este último incluye varias subdivisiones. Estos tres grupos se representan en la figura 4.

- Diamagnetismo. Una sustancia diamagnética es aquella que tiene una susceptibilidad magnética negativa. Esto significa que la intensidad de magnetización inducida por el campo H está en la dirección opuesta a H . La sal, el grafito, el yodo y el cuarzo son ejemplos de sustancias diamagnéticas.
- Paramagnetismo. Por definición todos los materiales que no son diamagnéticos son paramagnéticos, estos es, cuya susceptibilidad k es positiva.
- Ferromagnetismo. El Hierro, el Cobalto y el Níquel son elementos paramagnéticos en los cuales la interacción entre los átomos y los grupos de átomos, es tan fuerte que hay un alineamiento de momentos dentro de grandes regiones o dominios de la sustancia. Mientras que las susceptibilidades de la mayoría de los materiales diamagnéticos y paramagnéticos son menores que $\pm 10^{-3}$ emu, los tres elementos ferromagnéticos mencionados tienen valores de 10^6 veces el anterior. El ferromagnetismo también decae con la temperatura y desaparece a temperaturas mayores de la temperatura de Curie.

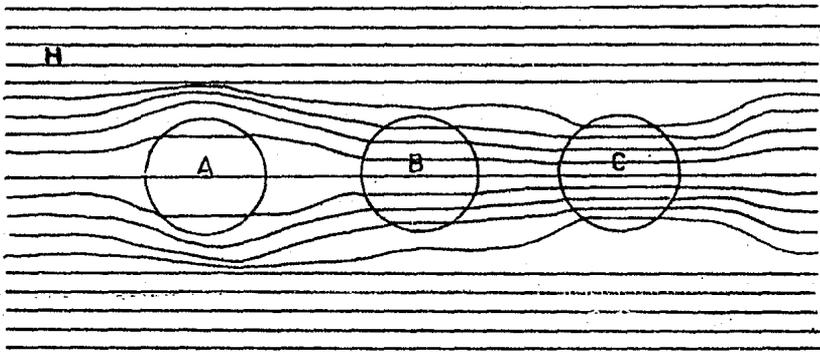


FIG 4

Materiales:

A Diamagnético

B Paramagnético

C Ferromagnético

En un Campo Magnético \vec{H}

- Ferrimagnetismo. Materiales en los cuales los dominios magnéticos están subdivididos en regiones, las cuales pueden estar alineadas en oposición a otra, pero cuyo momento magnético no es cero cuando $H = 0$, son llamados ferrimagnéticos. Ejemplos de estos: la magnetita, la titanomagnétita, la ilmenita, los óxidos de fierro, el fierro, el titanio; la pirrotita es un mineral magnético de segundo orden.
- Antiferromagnetismo. Si los momentos magnéticos netos de los subdominios paralelos y antiparalelos se cancelan uno a otro en un material que de otra manera debería ser considerado ferromagnético, la susceptibilidad resultante es muy pequeña del orden de las substancias paramagnéticas. Tales materiales son llamados antiferromagnéticos. La hematita es el ejemplo más común.

II. 3.a Susceptibilidad Magnética de Rocas y Minerales.-

La susceptibilidad magnética es una variable muy importante en Magnetometría. La susceptibilidad es una medida de la facilidad de magnetización y puede ser considerada como una medida de el número de magnetos elementales por unidad de volumen del material y de su movilidad, o de la facilidad con la cual ellos pueden ser orientados en presencia de un campo magnético externo.

La susceptibilidad (k) no es constante para un material dado ya que se observa una gran variación en los valores de k , aun para una roca en particular y un gran traslape entre los valores de susceptibilidad para diferentes tipos de roca. Las rocas sedimentarias tienen los valores promedio más bajos de susceptibilidad y las rocas ígneas los más altos. En cada caso, la susceptibilidad depende principalmente de la cantidad de minerales ferromagnéticos presentes, tales como la magnetita y la titanomagnetita, y algunas veces la ilmenita o la pirrotita.

Colocando un cuerpo magnetizable bajo la influencia de un campo magnético, los momentos dipolares de sus partículas tienden a alinearse dentro del cuerpo en la dirección del campo magnético. El cuerpo así toma un grado de magnetización la cual es proporcional a la intensidad del campo magnético y también depende de la facilidad de magnetización del cuerpo.

II.4 Paleomagnetismo.-

El Paleomagnetismo es la rama de las ciencias de la Tierra que sobre la base del estudio del Magnetismo Remanente Natural (MRN) de las rocas de la corteza terrestre define las características del Campo Geomagnético (CGM) en el pasado geológico.

Sus aplicaciones están basadas en el conocimiento simultáneo de la dirección y de la intensidad de la remanencia magnética primaria de las rocas y de la edad en la cual éstas adquirieron tal magnetización; sólo cuando ambos parámetros se conocen con suficiente precisión, se pueden utilizar los resultados obtenidos de estos estudios para definir las características del campo geomagnético terrestre en un momento dado del pasado geológico.

Los estudios paleomagnéticos pueden aplicarse en ciertos casos, para ayudar a definir la edad de las rocas asignadas a ciertos períodos geológicos pero cuya ubicación dentro de los mismos no es posible precisar con datos paleontológicos y estratigráficos disponibles.

Así mismo, los estudios paleomagnéticos se pueden aplicar a la resolución de otros problemas asociados a las ciencias de la Tierra. Una de las aplicaciones más difundidas de los estudios paleomagnéticos es la relativa a la determinación de los desplazamientos horizontales y de las rotaciones que los bloques continentales han experimentado en el pasado geológico. Esta aplicación se basa sobre el hecho de que cuando el campo magnético terrestre se promedia por períodos del orden de los

10,000 años o más, se comporta como un campo dipolar, axial y geocéntrico.

Por otra parte la cronología de las reversiones de polaridad del CGM definida sobre la base de estudios paleomagnéticos han permitido cuantificar los desplazamientos continentales Cenozoicos - Mesozoicos postulados por la teoría de la expansión del fondo oceánico y de la tectónica global.

Así mismo, se ha sugerido que el estudio del magnetismo remanente de cuerpos extraterrestres, tales como los meteoritos y muestra lunares, permitirá conocer si otros cuerpos celestes han poseído un campo magnético propio, similar al de la Tierra, conocimiento de vital importancia para comprender el proceso de evolución de dichos cuerpos, a través del análisis de la estabilidad de su magnetismo remanente natural (si es que existe) y del comportamiento magnético de sus minerales.

II.4.a Síntesis Histórica del Paleomagnetismo.-

Alrededor del año de 1600 fue cuando se comenzó a estudiar el magnetismo con W. Gilbert en Inglaterra, a éste le sucedieron entre otros, los estudios de el Barón Alejandro Von Humboldt en 1797, sobre el comportamiento magnético de una montaña.

Más tarde Delesee en 1849, Melloni en 1853 y Folgerahajter en 1899 encontraron que el magnetismo remanente de las rocas tenía una dirección y sentido semejante al CGM actual; también Brunhes poco tiempo después encontró reversiones magnéticas en 1906, estas fueron comprobadas posteriormente por otros investigadores como Mercanton en 1926 y Matuyama en 1929 (quien relacionó las reversiones magnéticas con la escala del tiempo, con lo que se proporcionó la primera datación de edad de uno de los cambios de polaridad del CGM.); Chevalier en 1925 estimó la variación secular del CGM en tiempos históricos.

Desde entonces a la fecha, las investigaciones paleomagnéticas se han incrementado, así McElhinny en 1973 señaló que para el año de 1970 el número de investigaciones paleomagnéticas ascendía al orden de las mil quinientas.

Actualmente se han desarrollado nuevas ideas, mejores instrumentos y se han implementado nuevas técnicas, con las cuales el Paleomagnetismo ha alcanzado un lugar importante dentro de las Ciencias de la Tierra.

II.4.b Magnetismo Remanente Natural.-

El Magnetismo Remanente Natural (MRN) de las rocas depende de la composición mineralógica, origen y evolución de las rocas, y de los campos magnéticos presentes desde su génesis e historia geológica.

Este magnetismo es originado por minerales de comportamiento ferromagnético, principalmente por óxidos y sulfuros de hierro, los cuales representan generalmente un pequeño porcentaje de la composición total de las rocas.

El MRN representa la suma vectorial de varios magnetismos remanentes de orígenes diversos, básicamente: Magnetismo Remanente Primario (MRp) adquirido al tiempo de la formación de la roca y el Magnetismo Remanente Secundario (MRs) que se añade posteriormente a la roca después de su formación.

Generalmente el magnetismo de las rocas ígneas, principalmente en las extrusivas, es de mayor intensidad que el magnetismo inducido (J_i) mientras que en el resto de las rocas la relación se invierte; esto puede observarse del análisis del coeficiente de Koengisberger " Q " (MRN/J_i) para los distintos tipos de rocas analizadas.

En las rocas ígneas, comunmente, la componente mayor del MRN es el Magnetismo Remanente Térmico (MRT); éste es el generado al enfriarse el magma original desde temperaturas mayores que el punto Curie y de bloqueo de sus minerales magnéticos constituyentes, hasta la temperatura del medio ambiente, bajo la influencia de un campo magnético. La temperatura de Curie, bajo la cual los minerales adquieren una magnetización

espontánea y de bloqueo (a la cual aumenta el tiempo de relajamiento y el magnetismo se conserva) es característica de cada mineral.

Magnetismo Remanente Isotérmico (MRI).- Se origina en presencia de un campo magnético a temperatura constante e inferior a la de Curie, por ejemplo, en el caso de los rayos solares, por lo que es frecuente en las rocas situadas en los lugares topográficamente elevados. Su intensidad es proporcional a la del campo magnético, bajo límites de saturación y en general es menor a la del MRT.

Magnetismo Remanente Viscoso (MRV). Este se adquiere por exposición a los efectos de un campo magnético durante largos períodos de tiempo y depende de las propiedades del material y del tiempo de exposición.

Magnetismo Remanente Químico (MRQ). Se origina por cambios químicos debido a procesos de cristalización, de oxidación o de metamorfismo, ocurridos a temperaturas inferiores al punto de Curie. Cabe mencionar que en las rocas sedimentarias continentales, tales como areniscas, lutitas y limonitas rojas, el MRQ es la componente principal del MRN y su estabilidad es comparable a la del MRT.

Magnetismo Remanente Piezométrico (MEP). Se presenta por los efectos de magnetoestricción generados en las rocas por la acción de esfuerzos; depende de las características magnéticas del material y de la orientación de esfuerzos.

Magnetismo Remanente Detrital (MRD). Se genera por la orientación de las partículas magnéticas de acuerdo a las líneas de

fuerza del campo geomagnético. Su estabilidad depende del tamaño de grano de los sedimentos y del proceso de depósito. Magnetismo Remanente Anistérico (MRA). Se genera debido a la influencia de dos campos magnéticos, uno constante y otro variable y decreciente. Para una magnitud dada del constante, la MRA es tanto mayor cuanto más alta sea la intensidad del campo alterno, hasta un valor dado más allá del cual se alcanza el límite de saturación.

En términos generales la dirección del Magnetismo Remanente Térmico es paralela a la del campo geomagnético; es decir, que si el campo geomagnético poseía sentido contrario al actual en el tiempo de adquisición del MRT, entonces dicho magnetismo será de polaridad reversa al actual campo geomagnético (Magnetización Reversa). Cabe enfatizar que este magnetismo reverso depende del campo geomagnético y no del material en sí; en algunas situaciones poco frecuentes ciertos materiales pueden adquirir una MRT con sentido contrario al campo geomagnético ambiental, lo que se conoce como autoreversión, como es el caso de la dacita del Monte Haruna en Japón. Estos casos son escasos, de aquí que las reversiones se deban a cambios de polaridad del campo geomagnético en el transcurso del tiempo. La intensidad del MRT es relativamente grande, aun considerando campos magnéticos débiles tales como el campo geomagnético terrestre, además el MRT es muy estable comparado con los otros tipos de MRN y aparte es muy resistente a procesos de desmagnetización y tiene factores de relajación muy pequeños, por lo que permanece a temperatura ambiente, invariable por largos períodos.

III.- AREA DE ESTUDIO.

III.1 Selección de la Zona

En las rocas volcánicas el registro del CGM representa un instante de tiempo, porque el tiempo que tarda en enfriarse y adquerir el MRT es relativamente corto, este comportamiento es similar en los intrusivos pequeños. En los cuerpos intrusivos mayores debido a su lento enfriamiento, pueden cubrir intervalos del orden de hasta miles y millones de años. En lo que respecta a las rocas sedimentarias cada estrato representa un intervalo de tiempo de duración variable, de acuerdo a las condiciones de velocidad de depositación; este intervalo es siempre mayor que el de una unidad lávica.

Debido a que este estudio paleomagnético esta enfocado a la exploración geofísica, la zona de interés fue elegida por las altas anomalías magnéticas que ahí se presentan.

Este estudio se realizó en rocas volcánicas que son las que predominan en dicha zona y que representan las posibles causas de las altas anomalías.

En la figura 5 se muestra la localización del área de estudio dentro del Estado de Guerrero.

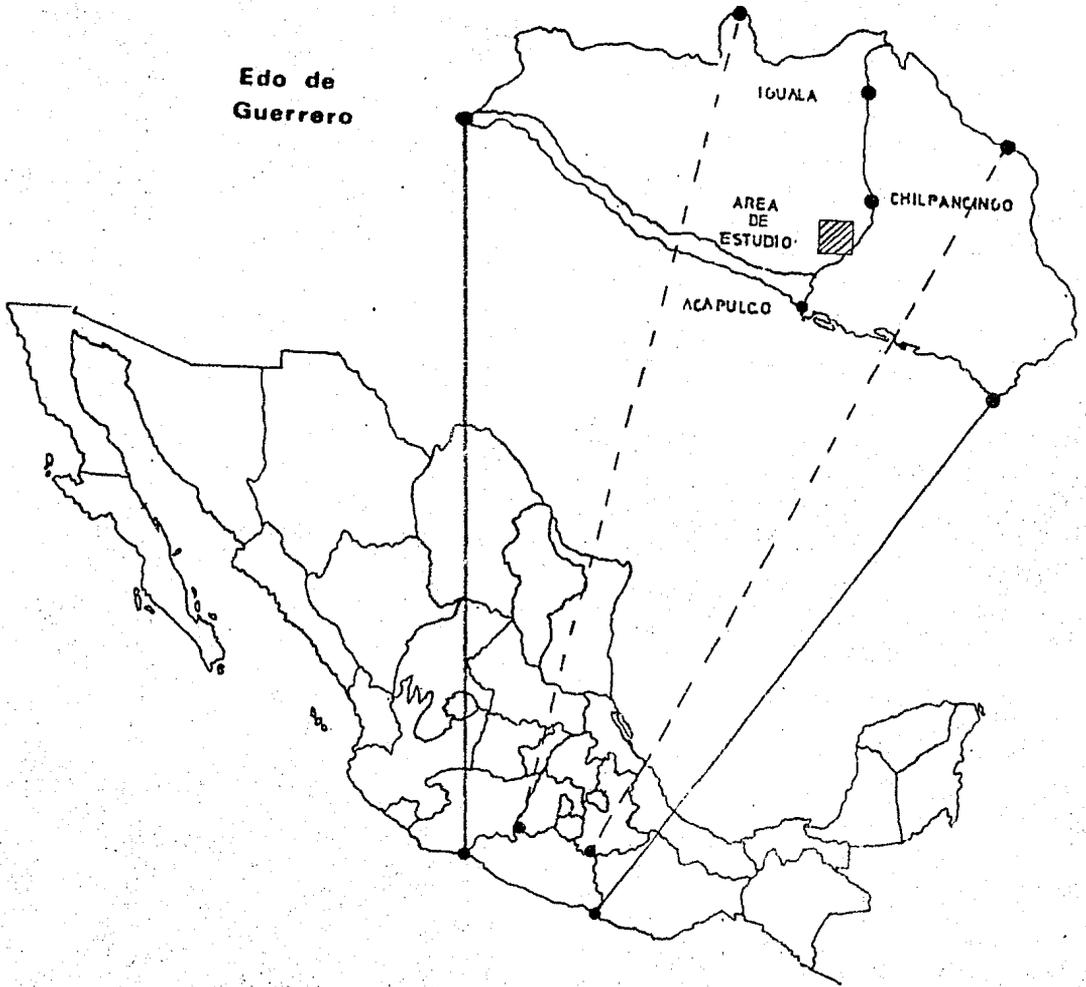


Fig. 5

III.1.a Localización y Vías de Comunicación.-

La zona de interés que fue muestreada se localiza al SE de la ciudad de Chilpancingo, a 6 Km al NW de la población de Rincón de la Vía, Gro. La vía de comunicación principal es la carretera México - Acapulco.

Para llegar a la zona de interés existe un camino de terracería (que se realizó para construir una presa) que es transitable solamente en tiempos de secas, ya que en época de lluvias parte del camino se bloquea. Existen otros dos caminos que vienen de los poblados de Cajelitos y Buenavista cuyas longitudes son aproximadamente de 8 y 9 Km respectivamente.

Es importante mencionar que estos caminos sólo nos acercan al área, debido a que la topografía de la zona estudiada es muy abrupta y no permite la entrada de vehículos. Las coordenadas geográficas de la zona son 17° 20' latitud Norte, y 99° 30' de longitud Oeste.

III.1.b Población.-

Rincón de la Vía es una población de 2000 habitantes que cuenta con los servicios públicos primarios: alumbrado público, teléfono, etc.

Parte de la población se dedica al campo y otra parte al comercio (talleres mecánicos, loncherías, misceláneas, etc.) principalmente porque se encuentra a la orilla de la carretera.

La población cuenta con una presa llamada " Ing. Fernando Galicia Islas " que tiene una capacidad de 2,000,000 m³ y una superficie de riego de 149 hectáreas.

III.1.c Clima y Vegetación.-

La región tiene un clima semicálido con lluvias en el verano, aproximadamente la precipitación anual media es de 1000 a 1200 mm. La altura promedio de sus sierras es de 1800 metros sobre el nivel del mar, la región está poblada por den sos bosques de pino, encino y madroño.

III.2 Geología Regional

El área de estudio se encuentra localizada en la parte central del Estado de Guerrero, al sur de la ciudad de México, entre los poblados de Agua de Obispo y Rincón de la Vía (Figura 6); el área comprende aproximadamente unos 150 Km² y se encuentra en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur.

Las sierras más altas del área sobrepasan los 2000 m de altura sobre el nivel del mar, el nivel base local está cerca de 600 m y se encuentra formado por el Valle del río Papagayo que desemboca en el océano Pacífico. El área ya alcanzó en alguna época la etapa de madurez en el ciclo geomórfico pero ha sido rejuvenecida.

III.2.a Fisiografía.-

Como se mencionó anteriormente la zona está ubicada en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur que se extiende a través de los estados de Jalisco, Guerrero y Oaxaca hasta el Istmo de Tehuantepec.

Esta serranía se prolonga en una longitud de 1200 Km con una anchura promedio de 100 Km y aunque en algunas partes alcanza alturas de 3500 m snm, el promedio de su elevación es aproximadamente de 2000 m snm. Está formada por rocas graníticas-gneísicas del Precámbrico, metasedimentos del Paleozoico, sedimentos plegados del Mesozoico y sedimentos continentales del Terciario. En el área estudiada se encuentran montañas de unos 2000 m snm aproximadamente, estas consisten calizas del Cretácico y rocas volcánicas del Terciario.

LEYENDA FIG. 6

POBLACION

DE 501 A 2,500 HABITANTES
CON MENOS DE 500 HABITANTES

Acolman
Corralejo

VIAS TERRESTRES

CARRETERA DE MAS DE DOS CARRILES, CASETA DE PAGO



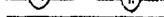
CARRETERA PAVIMENTADA



NUMERACION DE RUTA: FEDERAL, ESTATAL



TERRACERIA



BRECHA



VEREDA



FERROCARRIL DE SERVICIO PUBLICO, ESTACION DE FF. CC.



OTRAS VIAS FERREAS



LINEAS DE CONDUCCION

TELEFONICA, TELEGRAFICA



ELECTRICA DE 33 KV O MAS, DE MENOS 33 KV



CONDUCTO SUPERFICIAL, CONDUCTO SUBTERRANEO



OTROS RASGOS CULTURALES

ESCUELA, TEMPLO, ASISTENCIA MEDICA



MINA, POZO PETROLERO, BANCO DE MATERIAL



ZONA URBANA, CASA AISLADA, RUINA, CEMENTERIO



CERCA, BARRA O DIVISION



DEPOSITO DE AGUA, OTROS DEPOSITOS (ROTULADO)



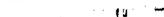
CANAL, PRESA, BORDO



PUENTE, TUNEL, PASO A DESNIVEL



EMBARCADERO, MUELLE, MALECON



FARO (2 DESTELLOS BLANCOS 15 MILLAS NAUTICAS), ROMPEOLAS



LIMITES

ESTATAL



INTERNACIONAL



PUNTOS GEODESICOS

VERTICE DE PRIMER ORDEN, DE SEGUNDO O TERCER ORDEN



BANCO DE NIVEL DE PRIMER ORDEN, DE SEGUNDO O TERCER ORDEN

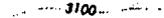


PUNTO DE NIVELACION ACOTADO (METROS)



REPRESENTACION DEL RELIEVE

CURVA DE NIVEL ACOTADA EN METROS



CURVA DE NIVEL ORDINARIA



CURVA DE NIVEL AUXILIAR



CURVA DE NIVEL APROXIMADA



DEPRESIONES, COTA FOTOGRAFICA (METROS)



RASGOS HIDROGRAFICOS

CORRIENTE PERENNE, CORRIENTE INTERMITENTE



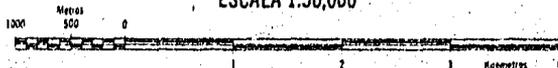
MANANTIAL, CORRIENTE QUE DESAPARECE



RAPIDOS, SALTO DE AGUA



ESCALA 1:50,000



III.2.b Geomorfología.-

En términos generales se ha visto que la presencia de rocas graníticas da lugar a formas redondeadas, debido a su intemperismo nodular, como sucede en la región de Tierra Colorada, el Gallo, el Ocotito, etc.

Las serranías formadas por metasedimentos como esquists, filitas y mármoles, dan un drenaje dentrítico intrincado, muy característico, debido a la fácil erosión de estas rocas.

Las zonas cubiertas por conglomerados y vulcanoclásticas presentan una topografía menos abrupta debido a que generalmente ocurren rellenando zonas bajas poco onduladas, sin embargo cuando se trata de coladas de lava se forman pequeños promontorios que destacan en el paisaje.

III.2.c Estratigrafía.-

La unidad estratigráfica más antigua es el Complejo Xolapa (Cámbrico-Cretácico) y está formado por rocas metamórficas. Los sedimentos originales clásticos son de edad precámbrica o paleozoica.

Esta unidad está cubierta discordantemente por la Formación Ixcuinatoyac, que consiste en filitas y cuarcitas probablemente paleozoicas (espesor 400 m) (Klesse, 1970).

Esta unidad a su vez está cubierta discordantemente por la Formación Chapolapa, de edad Triásico-Jurásico, que está constituida de rocas volcánicas y sedimentarias de color principalmente púrpura y verde (espesor 100m).

Las rocas volcánicas son de composición principalmente intermedia a ácida y pertenecen al área limítrofe entre los grupos de rocas que se clasifican como alcalicálcicas y calcio-alcalinas. Las rocas sedimentarias consisten de conglomerados, brechas, subgrauvacas, cuarcitas, grauvacas y algo de filitas. A esta unidad sobreyace discordantemente la Formación Morelos, que consiste de 500 a 1000 m de caliza y dolomita (Cretácico tardío-temprano) plegada.

Encima de la superficie de erosión post-cretácica, se depositaron rocas volcánicas terciarias que han sido incluidas en la Formación Agua de Obispo, que consiste en cuarzo, latita y rocas epiclásticas con un espesor de 800 m. y en la Formación Alquitrán constituida por piroclásticos riódacíticos y que cubren discordantemente la superficie de erosión post-cretácica. Las formaciones volcánicas son de edad oligocénicas y miocénicas, respectivamente.

III.2.d Descripción de las Formaciones Estudiadas.-

En la zona estudiada se puede observar principalmente rocas volcánicas que corresponden al Terciario y que son discordantes a todas las formaciones. Estas consisten de dos unidades que fueron denominadas por De Cserna (1965) como la Formación Agua de Obispo y Formación Alquitrán, las cuales se distinguen en el área por formar altas serranías y escarpados como el Cerro del Toro (el cual fue muestreado) y el Cerro de la Vaca.

Formación Agua de Obispo.-

Esta formación en la zona tiene un espesor de cerca de 800 m (Klesse, 1970) y consiste en partes de flujo de lava de composición cuarzo-latítica en su parte inferior y composición latítica en su miembro superior. Las cuarzo latitas son de color rojo y la latita es de color gris oscuro y en algunos lugares negras. Bajo el microscopio la latita muestra una textura pilotaxítica, los feldespatos son en parte potásicos y en parte plagioclasa; hay además algunos hilillos de Diópsido (que es un silicato cálcico-magnésico $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) y también abundante Hipereteno (Hyperathene) que es un mineral del grupo piroxeno cuya composición es magnesio y fierro. Otros minerales secundarios son la calcita y el cuarzo los cuales se presentan en vesículas.

DeCaerna (1965) asigna a la formación una edad del Oligoceno tardío y Mioceno temprano, en base a su posición estratigráfica.

Formación Alquitrán.-

Esta formación tiene aproximadamente un espesor similar a la Formación Agua de Obispo, cercano a 800 m, y la cubre discordantemente. El cerro llamado del Toro está constituida por rocas de esta formación. Esta consiste de flujos piroclásticos de varios grados de consolidación, el color de la roca es gris rosado y contiene fenocristales de cuarzo, feldespatos, biotita y hornblenda juntamente con fragmentos líticos. Su composición es riodacítica. Esta formación es más resistente que la formación que la subyace Agua de Obispo.

IV.- ANALISIS E INTERPRETACION MAGNETOMETRICA.

IV.1 Interpretación Magnética.-

El objetivo en la interpretación magnética es el de tratar de determinar el cuerpo anómalo que nos produce una anomalía magnética. Así, se trata de determinar la geometría del cuerpo, profundidad a la que se encuentra y sus características magnéticas. Para tal propósito se han desarrollado diferentes métodos de interpretación, los cuales pueden ser cualitativos o cuantitativos. Los primeros se basan en métodos empíricos desarrollados con anterioridad y nos dan una idea aproximada del cuerpo y sus características. Los métodos cuantitativos se basan en desarrollos matemáticos y computacionales.

El análisis cuantitativo de los datos magnéticos es, en general, más difícil que el de los datos de gravedad y esto es debido a varias razones entre las cuales se encuentran: la variación que puede esperarse en la susceptibilidad; la incertidumbre acerca de la dirección de polarización de las rocas, ya que la magnetización no siempre está orientada según el campo magnético terrestre; la naturaleza bipolar de las anomalías da origen a ciertas complicaciones para interpretar las anomalías cuantitativamente.

En general, la forma de la anomalía magnética depende de los siguientes factores, que deben ser considerados al momento de interpretar, dichos factores son: a) la geometría del cuerpo b) la dirección del campo geomagnético en la localidad don-

de se encuentre el cuerpo c) la dirección de polarización de las rocas que forman al cuerpo d) la orientación del cuerpo con respecto a la dirección del campo geomagnético e) la latitud donde se encuentre el cuerpo f) la orientación de la línea de observación (puede ser línea de vuelo) con respecto al eje del cuerpo.

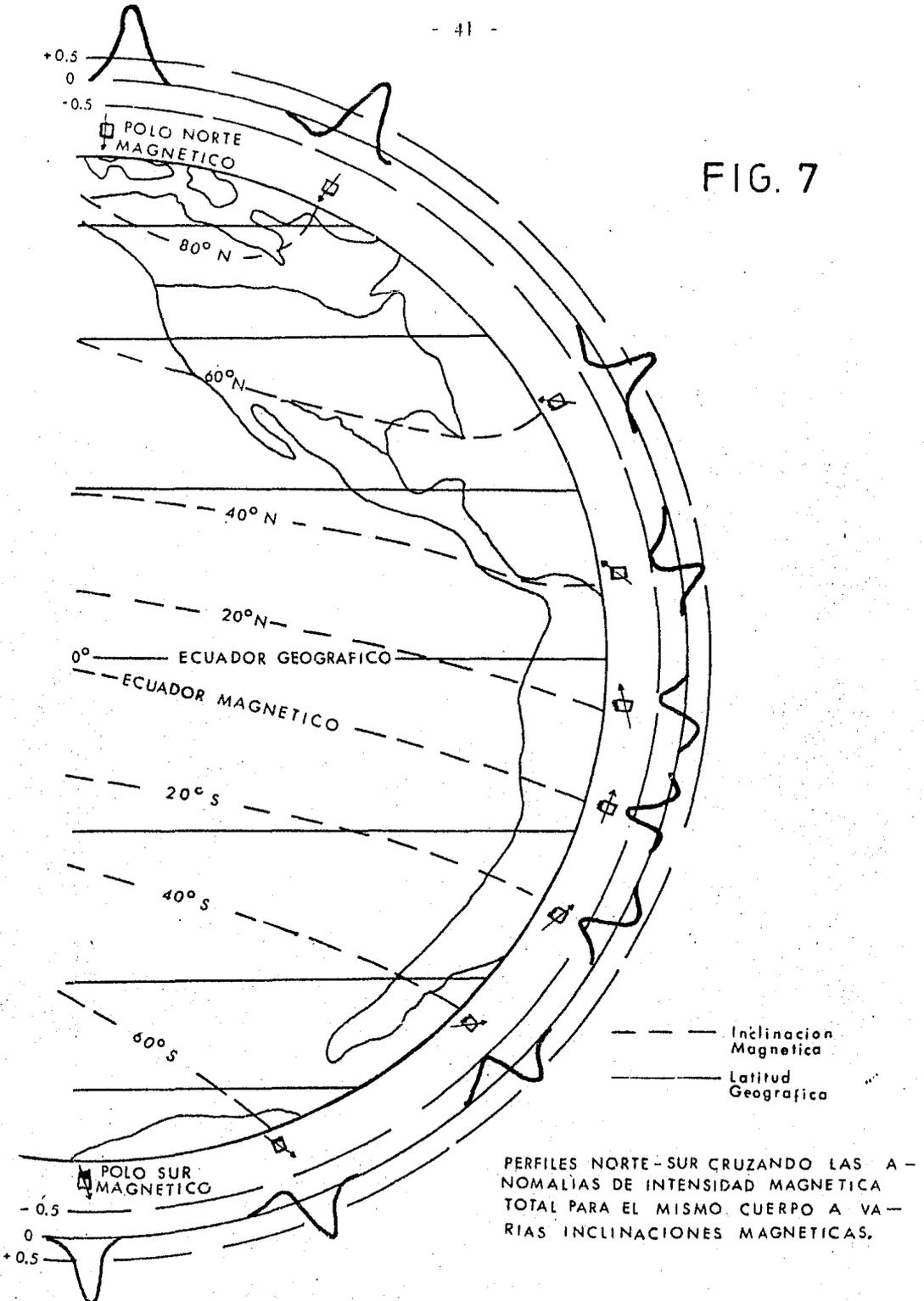
En la figura 7 se muestra la distribución de los perfiles Norte-Sur que cruzan las anomalías magnéticas de campo total causadas por el mismo cuerpo a diferentes latitudes (diferentes inclinaciones magnéticas), tanto para el Hemisferio Norte como para el Hemisferio Sur. A partir de esta figura nos podemos dar cuenta que la anomalía estudiada aquí (ver figura 11) se encuentra invertida como si estuviera localizada en el Hemisferio Sur y no en el Norte como se encuentra en realidad.

La interpretación magnética es básicamente un proceso de tres etapas:

- 1) Análisis de la calidad de los datos magnéticos.
- 2) Remover los efectos magnéticos regionales para aislar la anomalía de interés.
- 3) La interpretación geológica de la anomalía aislada.

Estas tres etapas están relacionadas unas con otras.

FIG. 7



IV.1.a Análisis de la Calidad de los Datos Magnéticos.-

Antes de interpretar cualquier conjunto de datos magnéticos es necesario examinar los datos básicos para ver si los datos son los adecuados para resolver el problema de exploración. Por ejemplo, si se realiza un levantamiento aeromagnético se debe rectificar: a) Conformidad en el espaciamiento y dirección de las líneas de vuelo. b) Altura de vuelo c) Calidad de mapeo e) Calidad y disponibilidad de perfiles topográficos f) Tipo de magnetómetro, etc.

IV.1.b Separación de Efectos Regionales.-

Como se mencionó anteriormente, el campo magnético terrestre varía como una función de la latitud, de la longitud y del tiempo. El promedio o campo magnético regional de la Tierra se conoce como el Campo Normal de la Tierra. El campo normal de la Tierra es con frecuencia removido mediante programas de computadora, los cuales aproximan el campo geomagnético mediante armónicos esféricos a partir de los datos proporcionados por los satélites. Generalmente, para áreas pequeñas, el campo geomagnético puede ser aproximado a un plano y entonces removerlo mediante una substracción.

Operadores Matemáticos.- Muchos operadores matemáticos se han diseñado y utilizado para filtrar y resolver anomalías residuales de mapas magnéticos. El filtrado puede ser hecho en el dominio del espacio mediante operadores convolucionales ó en el dominio de la frecuencia empleando la teoría de la Transformada de Fourier. Entre los operadores matemáticos típicos

se encuentran los siguientes:

a) Reducción al Polo.

El operador de la reducción al polo remueve el desplazamiento de las anomalías magnéticas debido a la polarización inclinada del cuerpo. La reducción al polo hace que la anomalía magnética aparezca como estaría en el polo magnético, con la anomalía positiva directamente sobre el cuerpo. El procedimiento de la reducción al polo ayuda a mostrar la localización de las fuentes de las anomalías magnéticas. Así pues, el método consiste en el cálculo de pseudoanomalías, las cuales serían causadas por los mismos cuerpos magnetizados pero bajo la doble asunción de que la magnetización y el campo normal son verticales.

b) Derivadas e Integrales.

Los operadores que emplean las derivadas ayudan a resolver las componentes de alta frecuencia del campo magnético.

Los operadores integrales, por el contrario, enfatizan las bajas frecuencias. Así por ejemplo, el operador de la segunda derivada nos ayudaría a delinear los contornos del cuerpo que nos provoca la anomalía.

c) Filtros Pasa Bandas.

Los filtros pasa bandas, incluyendo el pasa altas y el pasa bajas, permiten el estudio de ciertas componentes de frecuencia del campo magnético. Los filtros pasa altas tienden generalmente a enfatizar los cuerpos someros, sin embargo, se debe recordar que aun los cuerpos someros tienen algunas componentes de baja frecuencia, las cuales serán distorsionadas en el simple proceso del filtrado. Así, los filtros pasa ban-

das, no separarán perfectamente si la fuente se encuentra somera, profunda o intermedia, sin embargo, cualitativamente, los filtros pasa bandas resaltan las anomalías de sus fuentes en ciertos rangos de profundidad.

d) Continuación Ascendente y Continuación Descendente.

Teóricamente, si el campo magnético (o gravitatorio) es conocido en un nivel, puede ser calculado a uno más alto o más bajo, siempre y cuando el campo magnético no sea continuo al nivel donde se encuentran las fuentes magnéticas. La continuación ascendente actúa como un filtro pasa bajas y tiende a remover las anomalías superficiales. La continuación descendente es por el contrario, un filtro pasa altas y tiende a ser completamente inestable cuando el ruido de alta frecuencia es amplificado altamente. También se debe tener cuidado que la continuación descendente no alcance las fuentes magnéticas. La continuación descendente propiamente hecha puede ser muy útil debido a que los mapas magnéticos a un nivel más bajo mostrarán más detalles que el mapa de intensidad total.

e) Filtros Direccionales.

Los filtros direccionales pasan frecuencias, las cuales tienden en cierta dirección. Así por ejemplo, si se tiene en un mapa magnético un fuerte gradiente Norte-Sur, el cual obscurece la tendencia Este-Oeste, un filtro direccional Este-Oeste puede ser aplicado para resaltar la tendencia Este-Oeste.

IV.1.c Análisis de la Anomalía Residual.-

Ya cuando el mapa de intensidad total ha sido derivado, junto con cualquier otro mapa que pueda ser requerido, entonces la geología del subsuelo, la cual causa las anomalías magnéticas, puede ser interpretada. Varios factores deben considerarse en el análisis de las anomalías:

a) Efectos de Inclinación y Declinación Magnéticos Locales.

Las anomalías magnéticas están relacionadas a la susceptibilidad y a la geometría del cuerpo fuente y también a la inclinación y declinación magnética local. Es importante estudiar las curvas de la anomalía para cuerpos teóricos en la latitud magnética local de una interpretación dada para obtener una orientación para la localización para la localización del cuerpo fuente que provoca la anomalía.

b) Análisis Cualitativo.

En muchos casos los mapas magnéticos pueden ser cualitativamente interpretados para determinar la localización de fallas, de una cuenca sedimentaria, del basamento magnético etc. Debe de tenerse en cuenta que los mapas magnéticos en sí, no son mapas de la estructura del basamento, que las anomalías grandes no son probablemente debidas a la estructura del basamento y que algunas de las anomalías más pequeñas pueden ser las más significativas desde el punto de vista estructural. En el caso de interpretaciones cualitativas hay que tener en cuenta que una anomalía puede significar, o bien un relieve en la superficie del basamento, o bien una variación de la susceptibilidad. Las variaciones en la polarización de las rocas del

basamento enterradas a 1.5 Km o más, pueden dar por resultado anomalías de hasta varios miles de gamas. A esta misma profundidad características estructurales del tipo buscado en la prospección petrolera, rara vez producirían anomalías mayores de 50 gamas.

c) Estimación de la Profundidad

Uno de los usos de los datos magnéticos, es el de la estimación de la profundidad del basamento magnético o de un cuerpo de interés económico. Estas profundidades son contorneadas para hacer un mapa del basamento o bien un análisis de la profundidad del cuerpo, pero debe tenerse en cuenta que las profundidades magnéticas pueden tener una incertidumbre considerable, generalmente en un 10% o más.

Las estimaciones de las profundidades de las fuentes magnéticas o del basamento pueden ser realizadas por métodos que emplean la pendiente de la anomalía, el ancho de la anomalía o bien por métodos computarizados.

d) Modelado de la Estructura.

La última etapa en la interpretación magnética es el modelado de la estructura que nos provoca la anomalía magnética. Esto se hace con la construcción en 2D o 3D de la distribución de la susceptibilidad magnética que concuerde con los datos magnéticos observados.

IV.2 Ambigüedad en la Interpretación.-

Es bien sabido que la relación cuerpo-anomalía es única cuando tenemos el problema directo, es decir, si estamos modelando un cuerpo cualquiera su anomalía magnética es única. Si este cuerpo es de alguna forma geométrica en particular nos producirá un tipo de curva característica, que variará según las características que le demos (susceptibilidad, profundidad, inclinación, remanencia, etc.). En cambio cuando se trata con el problema inverso, es decir, dada una anomalía encontrar que cuerpo la produce, la solución no es única, ya que pueden existir una infinidad de modelos que se aproximen a la anomalía existente. Y esto se debe a que no hay manera de saber con exactitud que tipo y forma de cuerpo existe en el subsuelo. Una manera de atenuar dicha ambigüedad es ir a muestrear o perforar la zona donde se encuentra la anomalía de interés, claro que para esto es necesario una interpretación preliminar para tener una idea de donde se debe perforar, además esta técnica de perforación es bastante cara.

Por otro lado se tiene la indecisión de que si determinada anomalía magnética está originada por una desigualdad topográfica en la superficie de las rocas del basamento o por un cambio lateral de la susceptibilidad magnética.

Otra forma en que se puede generar una falsa anomalía es en el momento del levantamiento magnético, sobre todo si éste se ha hecho de manera aérea, esto es debido a que cuando se realizan levantamientos de contorno (es decir, siguiendo la topografía en forma paralela), el avión tiene limitaciones

y se hacen a diferentes niveles de vuelo. Esto provoca que al correlacionar los datos de vuelo con el área estudiada se tengan anomalías desplazadas, debido a las características de posicionamiento del avión respecto al lugar donde se hizo la lectura. Claro que este tipo de errores se pueden reducir teniendo un mejor sistema de posicionamiento, como el que puede ser mediante el uso de satélites.

Por estas razones, las investigaciones magnéticas son raramente decisivas por sí mismas, sino que se necesita un control independiente por otros métodos geofísicos y geológicos.

IV.3 Descripción y Análisis de la Anomalía Estudiada.-

La anomalía magnética situada sobre el Cerro del Toro y Cerro de la Vaca, en las proximidades del poblado Rincón de la Vía, en el Estado de Guerrero, es una anomalía magnética de gran intensidad (ver Fig. 8). La intensidad de esta anomalía es tan fuerte, que el magnetómetro utilizado no alcanzó a dar lectura en sus valores máximos o mínimos. Por lo cual se utilizó el método de mínimos cuadrados para interpolar los valores aproximados de su máximo y del mínimo en un perfil A-B trazado sobre la anomalía. (ver Fig. 11).

La anomalía estudiada presenta una forma dipolar invertida, con su máximo magnético hacia el norte y el mínimo magnético hacia el sur (Fig. 8 y Fig. 9). Esta anomalía ocupa aproximadamente una extensión de cerca de 77 Km^2 , y se encuentra sobre una zona con topografía abrupta, con unas elevaciones de 1600 m sobre el nivel del mar. Sobre esta anomalía se trazó un perfil A-B con un rumbo de 18.5 NW , que se muestra en la figura 8. La diferencia entre el máximo y el mínimo inferido es de 2,200 gamas, y entre los observados es de 1,500. A este perfil se le trataron de ajustar diversos modelos de cuerpos geométricos mediante el algoritmo bidimensional de Talwani. Los parámetros magnéticos y geométricos utilizados se fueron variando, de acuerdo con la forma y orientación de la anomalía, hasta obtener un modelo óptimo.

Dicho modelo se presenta en la figura 15 y tiene los siguientes parámetros: profundidad 2 Km y un ancho de 3 Km

con una susceptibilidad de 0.03 emu, una inclinación de 50° y una intensidad de magnetización total o efectiva (magnetización remanente + magnetización inducida) de 13×10^{-3} A/m, y una declinación norte-sur.

A consecuencia del caracter dipolar invertido de la anomalía, no es posible usar en el modelado solo la magnetización inducida, la cual tiene la polaridad del campo magnético actual (declinación al norte e inclinación bajo la horizontal). Por tal motivo en el modelado se debe considerar una magnetización remanente con polaridad reversa.

Com los datos de interpretación anteriormente referidos podría pensarse que se trata posiblemente de un cuerpo ígneo intrusivo (ejemplo: un dique) lo que nos esta provocando esta anomalía, pero posteriormente se verá, en el análisis paleomagnético del lugar, que la conclusión anterior podría ser errónea y deberse unicamente a la fuerte remanencia existente en la zona.

IV.4 Procesado de la Anomalía.-

Para poder aplicarle diferentes algoritmos a la anomalía estudiada, tales como reducción al polo, continuación ascendente, primera y segunda derivada; se digitizó ésta con un espaciamiento de 200 metros.

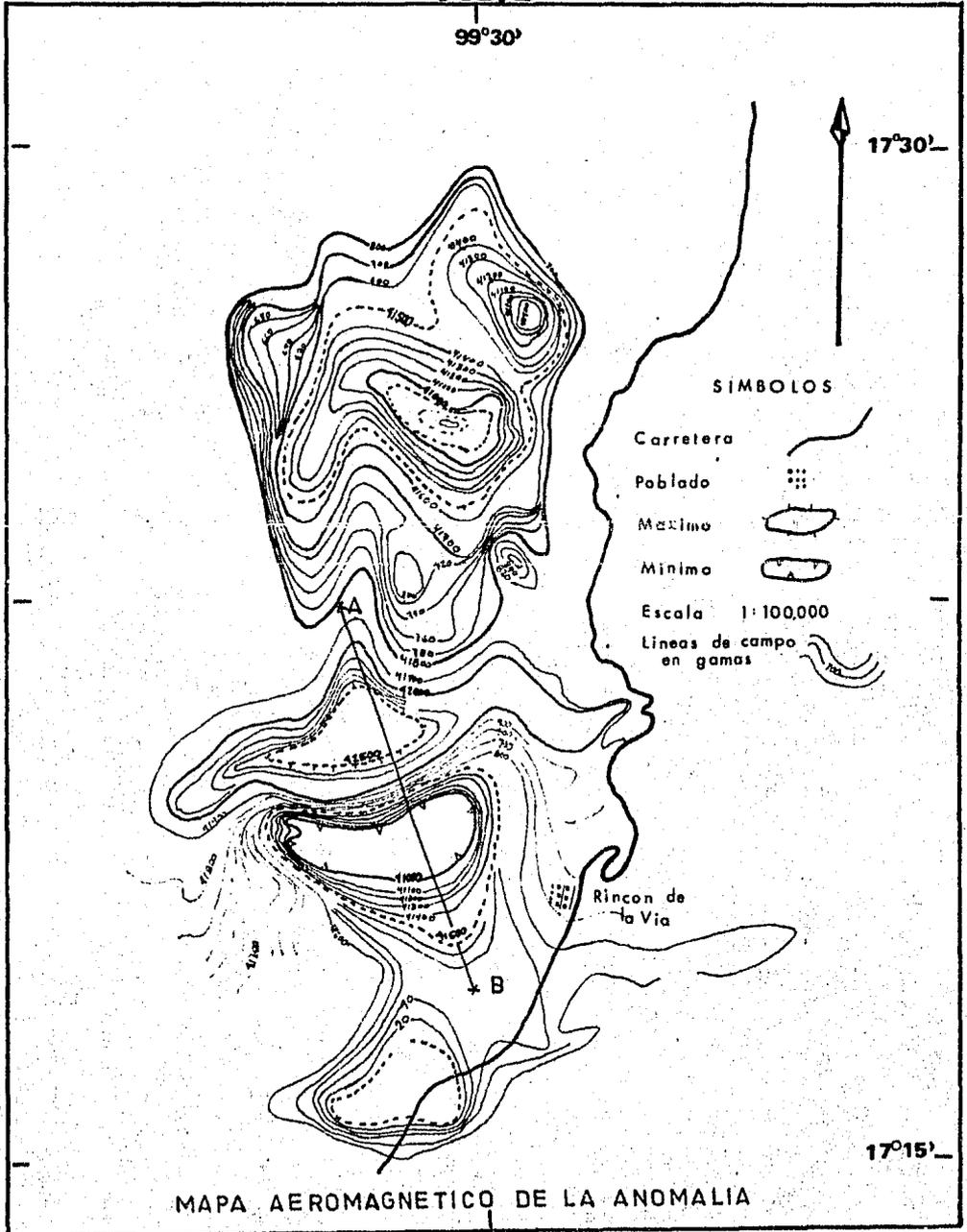
En la figura 10 se muestra el mapa de reducción al polo, en éste se puede apreciar como nuestro dipolo se convierte en un solo polo, con el cual se puede modelar más fácilmente el cuerpo y sus características, tal que nos reproduzcan la anomalía. El máximo valor es de 42,000 gamas y mediante la figura se puede apreciar aproximadamente en que coordenadas se encontraría el cuerpo fuente.

Se calcularon también la primera y segunda derivada, los mapas correspondientes pueden verse en las figuras 13 y 14.

Por otro lado, en la figura 12 se muestra la continuación ascendente realizada a 500 metros, donde se puede observar el suavizamiento que sufre nuestra anomalía dejando únicamente pasar las bajas frecuencias, eliminando los efectos superficiales. En la figura 12-A se tiene el perfil de la continuación a 500 metros. En él se puede observar que la forma de la anomalía se conserva, lo cual nos indicaría que el cuerpo fuente podría ser de dimensiones considerables y a una profundidad también grande.

FIG. 8

99°30'



MAPA AEROMAGNETICO DE LA ANOMALIA

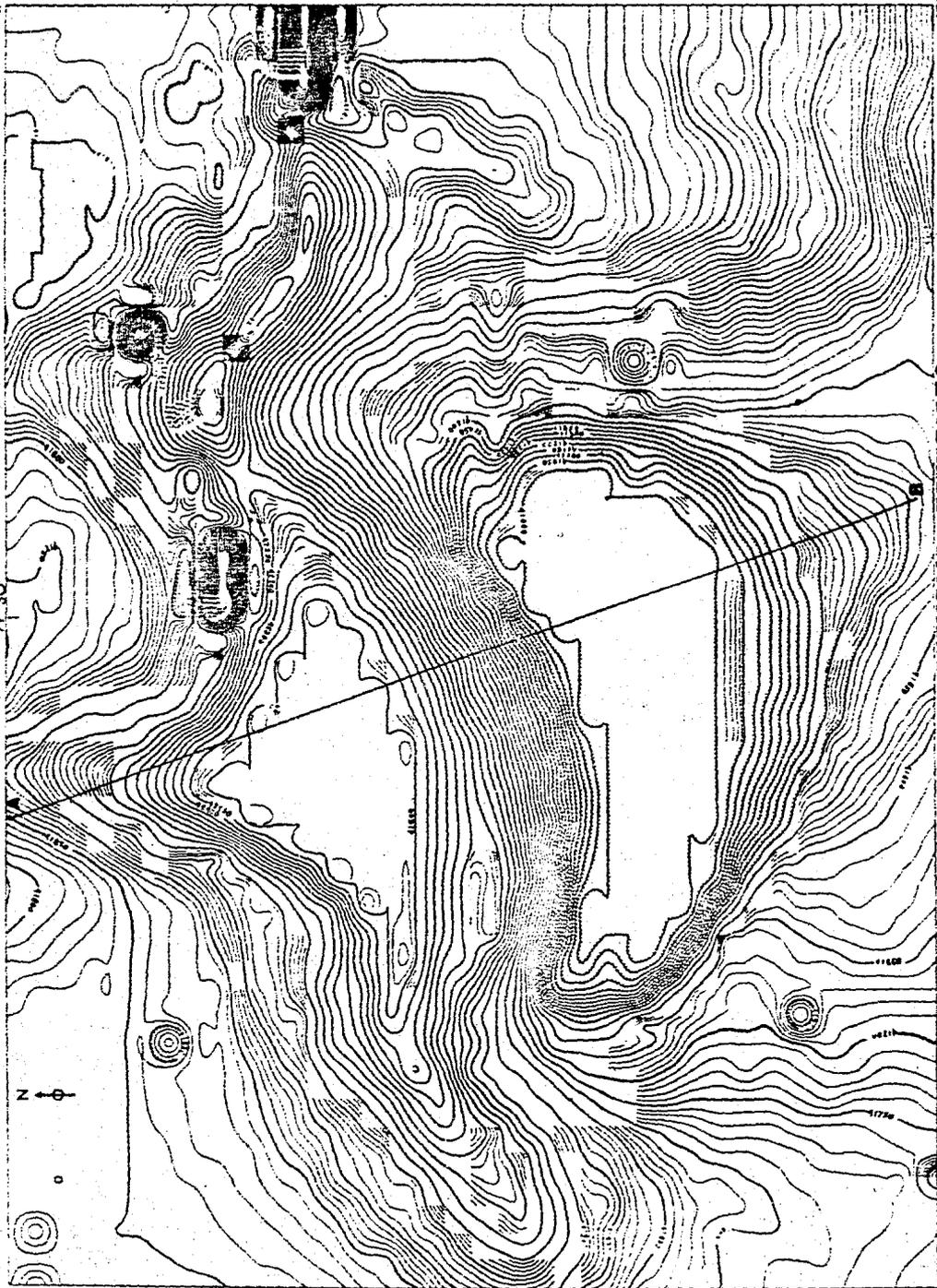
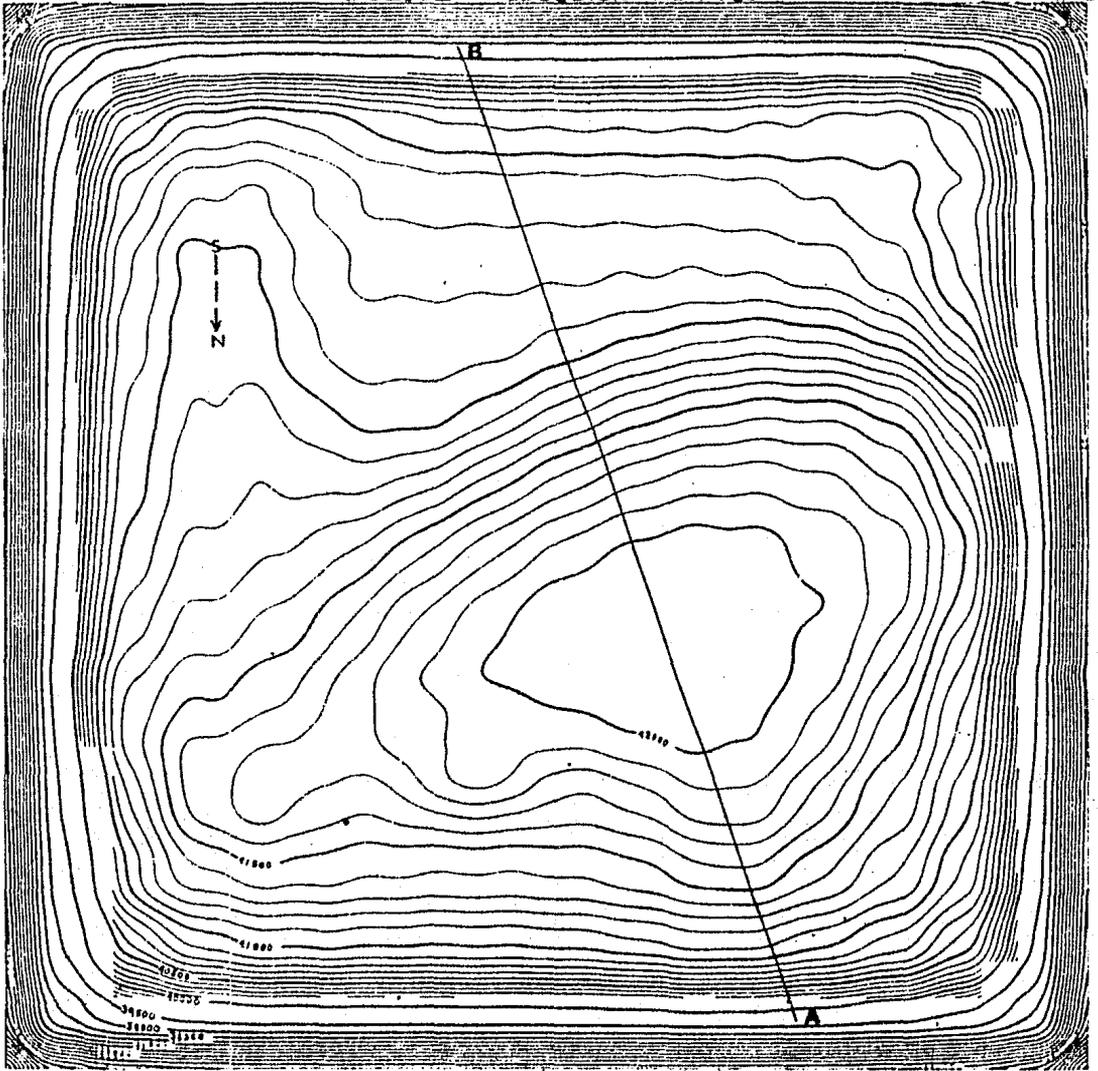


FIG. 9 ANIMALIA ESTUDIADA

FIG. 10 REDUCCION AL POLO

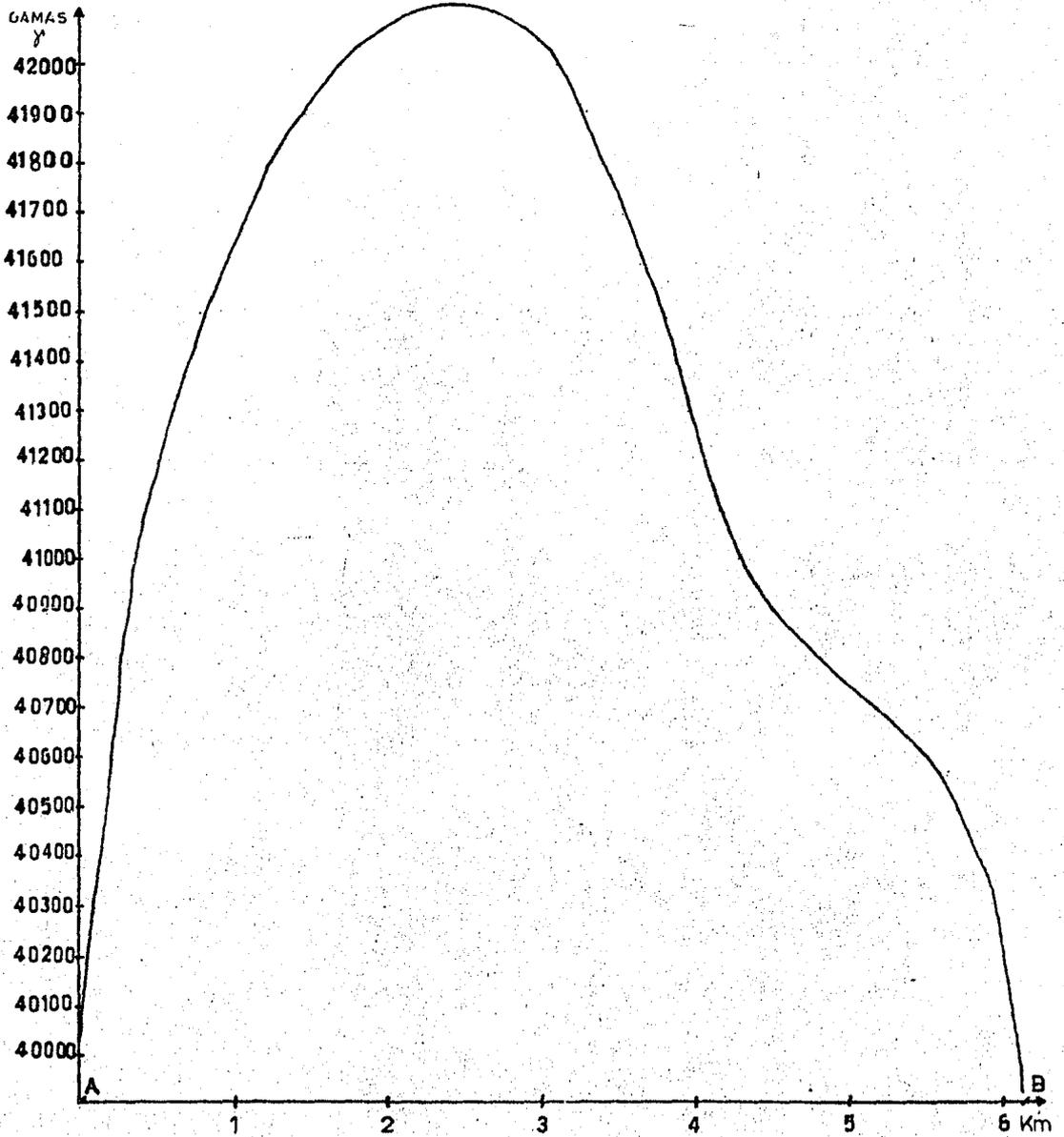
17°22'



99° 30'

17° 15'

FIG 10-A
Perfil de la Reduccion al
Polo



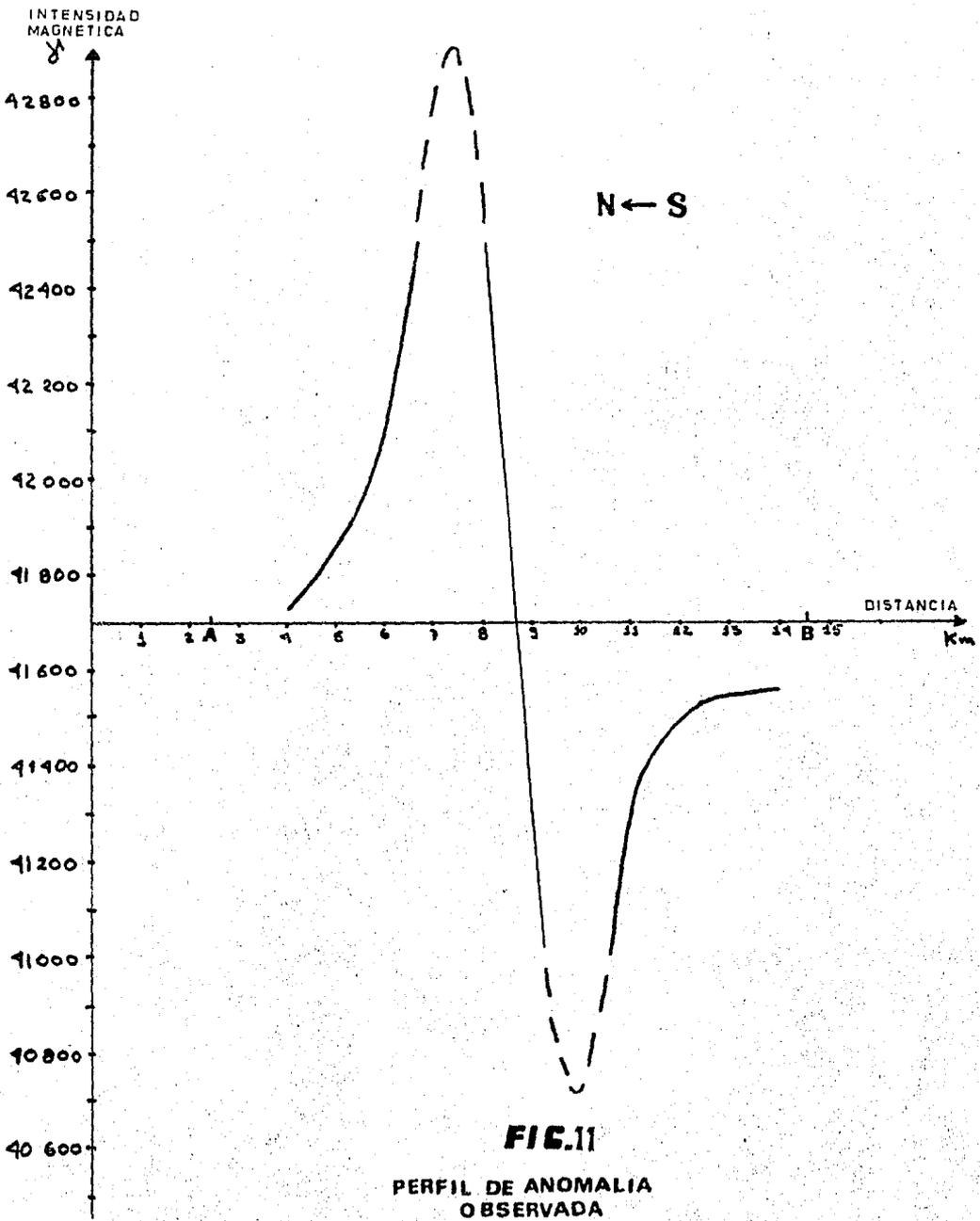
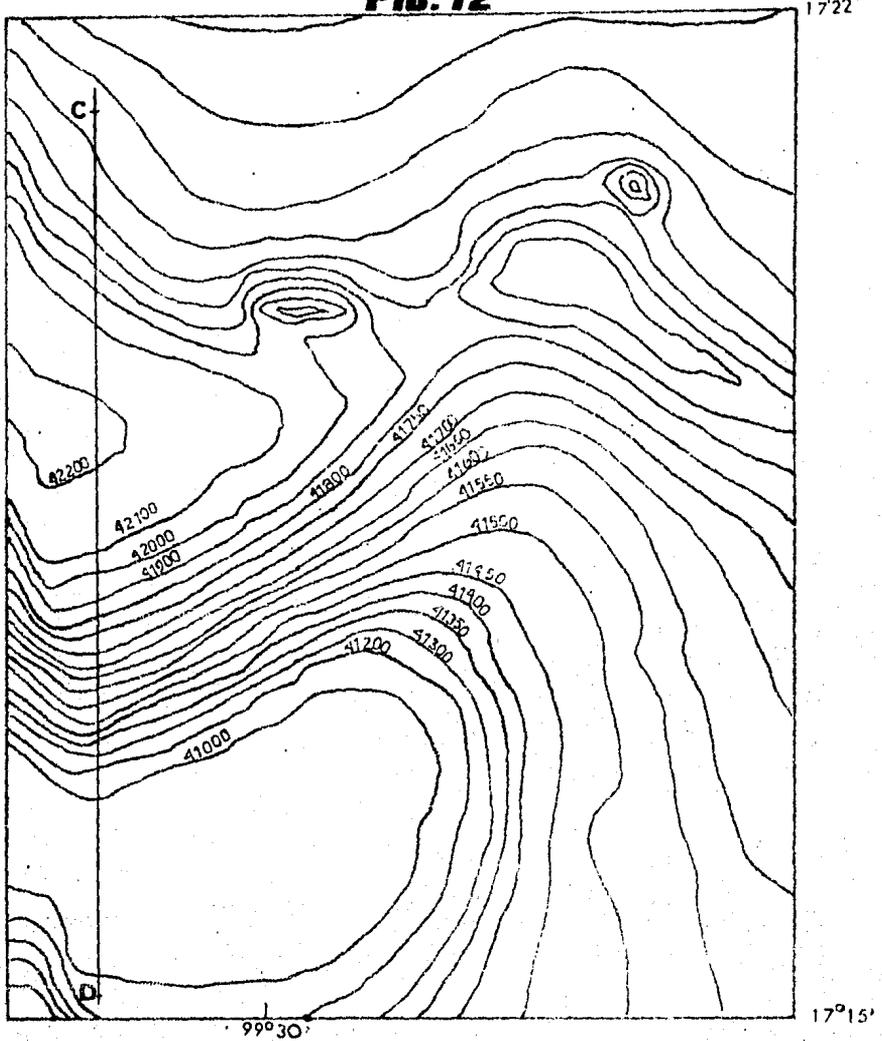


FIG.11

**PERFIL DE ANOMALIA
OBSERVADA**

FIG. 12



CONTINUACION ASCENDENTE

A 500 m.

FIG. 12.A
PERFIL DE
CONTINUACION ASCENDENTE A 500 m.

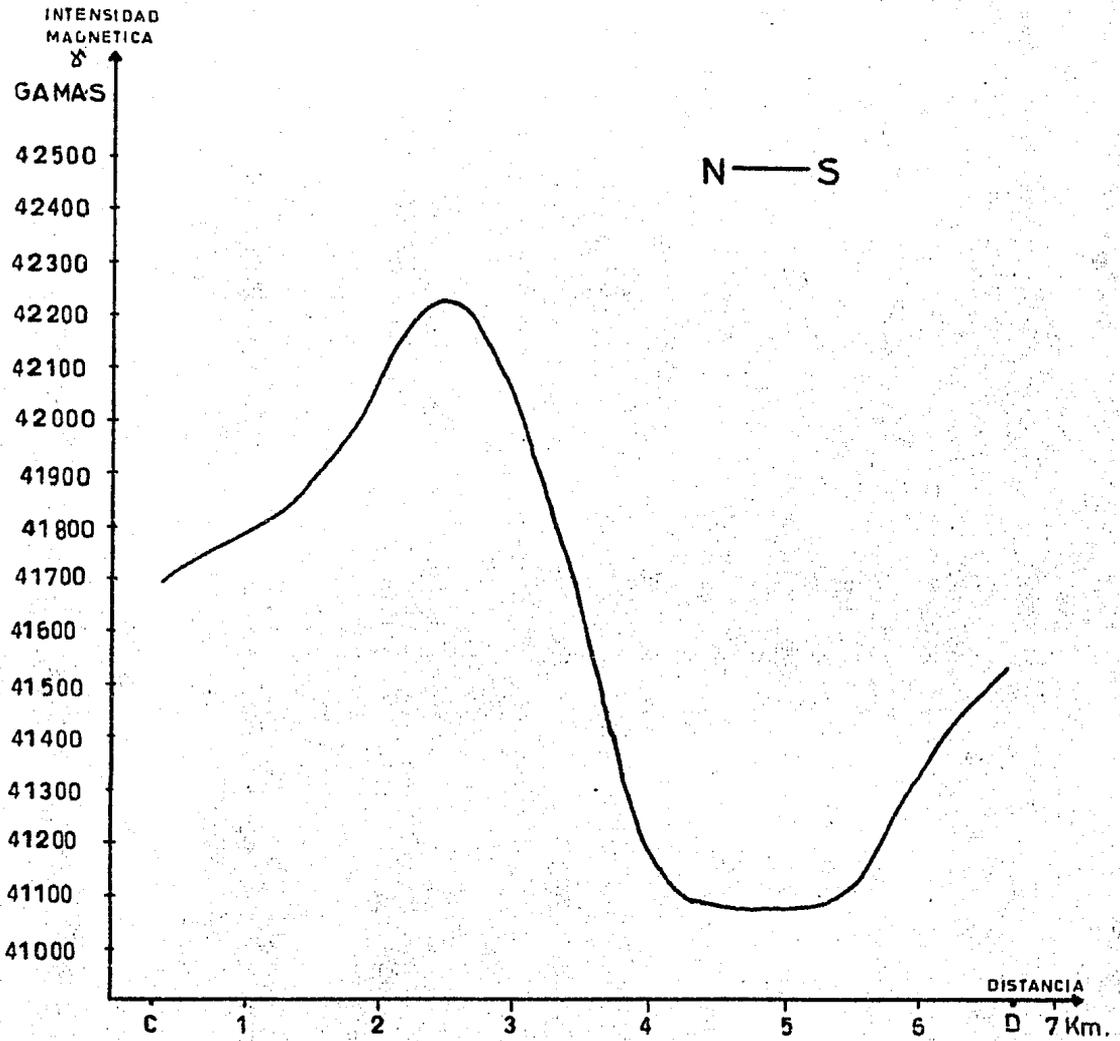
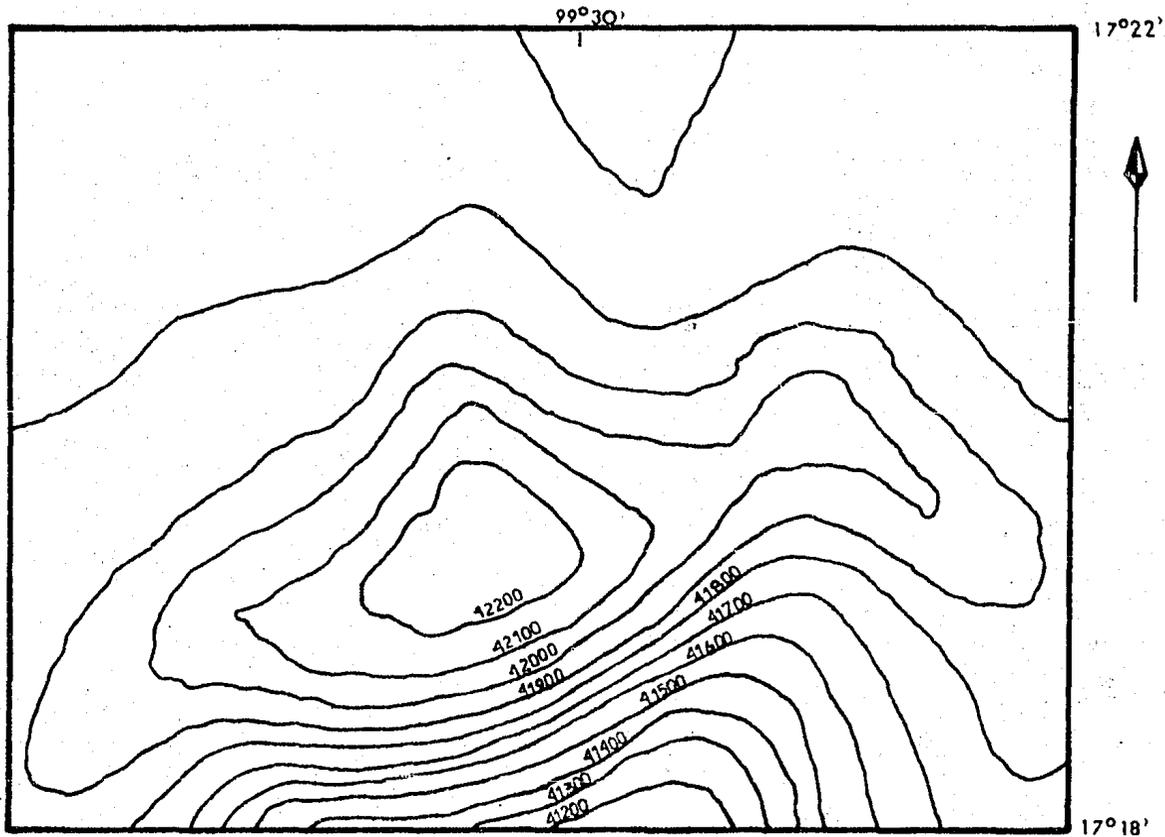
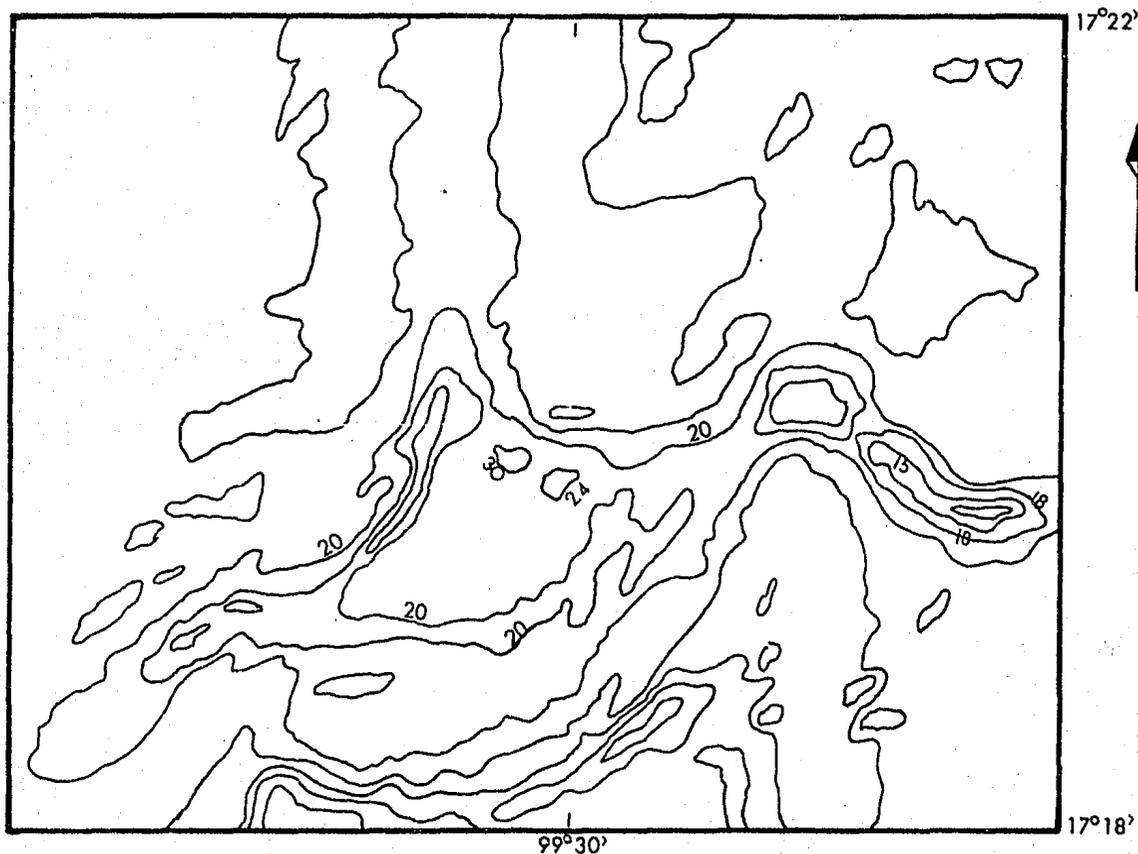


FIG. 12-B



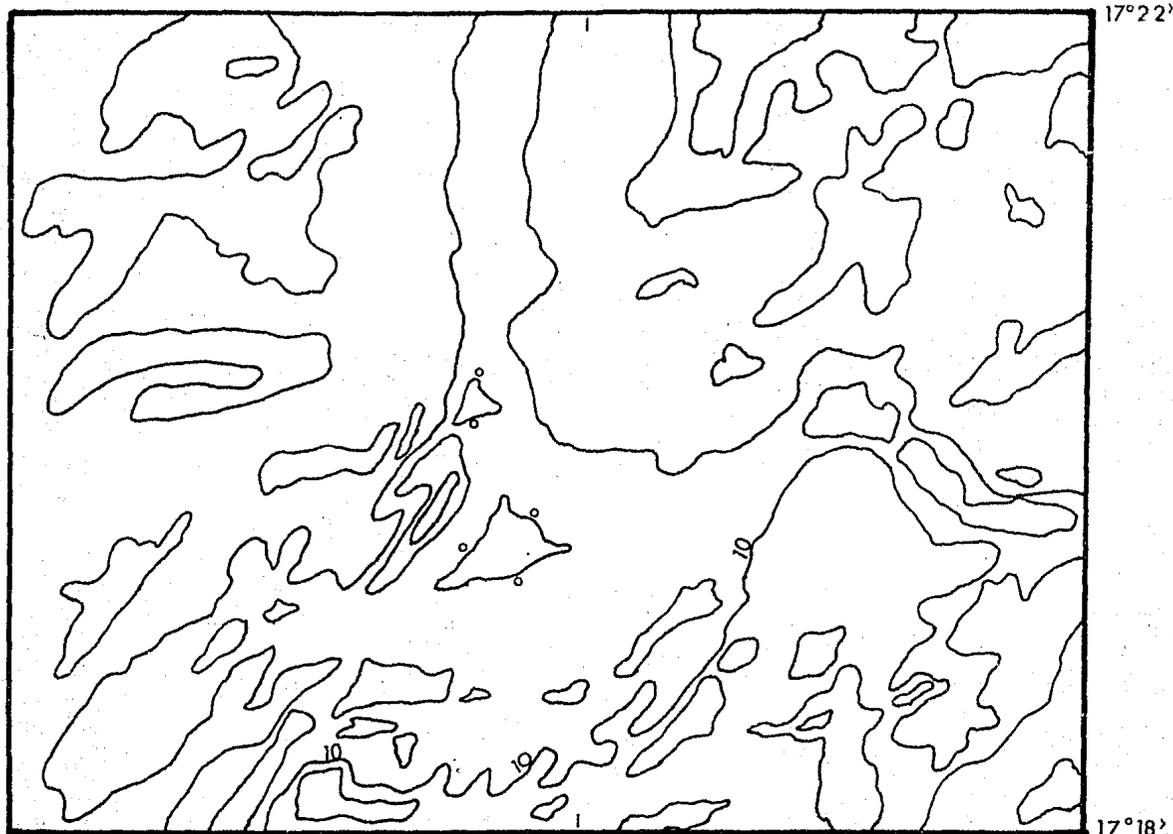
CONTINUACION ASCENDENTE A 400m.

FIG. 13



PRIMERA DERIVADA EN SUPERFICIE

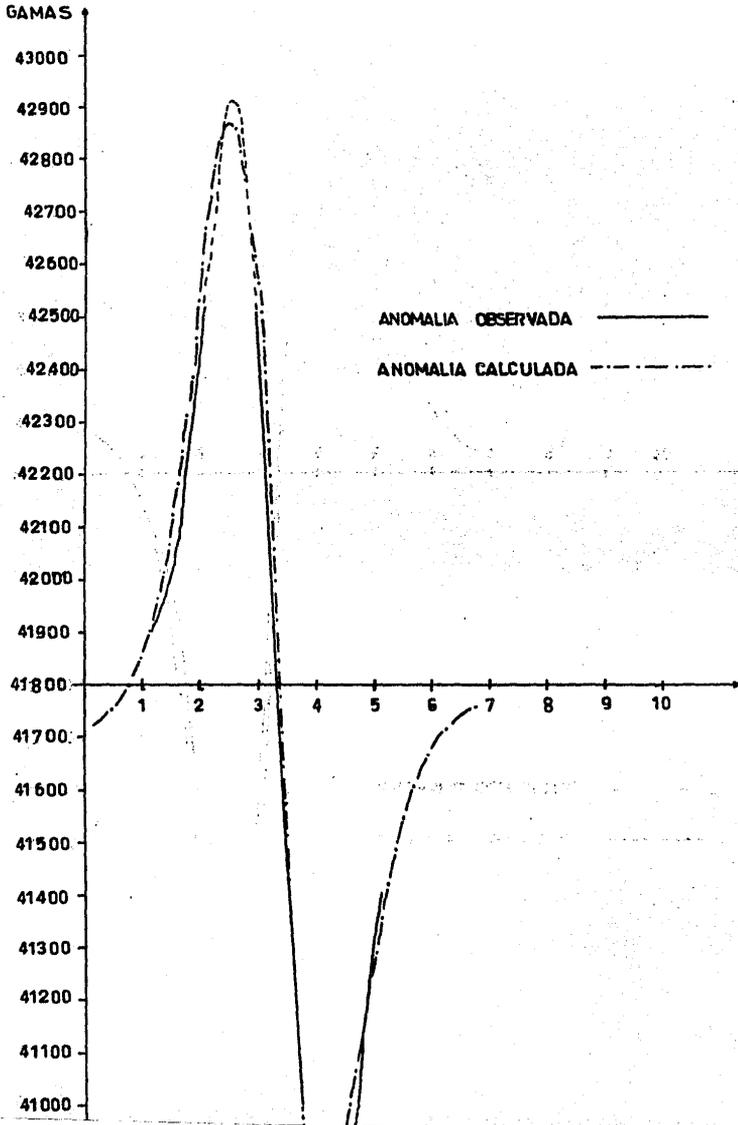
FIG. 14

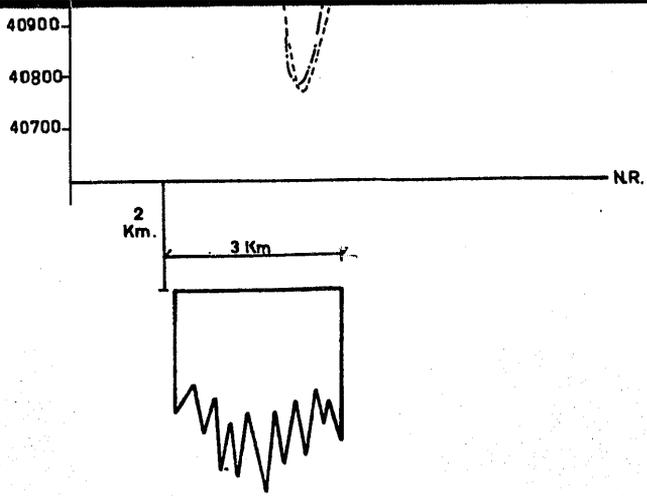


SEGUNDA DERIVADA EN SUPERFICIE

FIG. 15

COMPARACION DEL PERFIL DE LA ANOMALIA OBSERVADA Y CALCULADA





V.- ESTUDIO PALEOMAGNETICO Y DE MAGNETISMO DE ROCAS.

V.1 Trabajo de Campo.-

Existen dos métodos que se pueden utilizar para obtener las muestras de un estudio paleomagnético, que son: el de bloques y el de perforación en el campo. La selección del método se hace en base al objetivo del estudio, el equipo disponible y las características del lugar.

En ambos métodos se obtienen muestras orientadas con respecto a las coordenadas geográficas y a la vertical del lugar

En la tabla I se hace una comparación de los métodos de muestreo.

Para este trabajo se utilizó el método de perforación por las ventajas que representa.

Debido a que la zona es inaccesible en vehículo, se muestreó solamente un lugar llamado Barranca del Toro, el cual fue dividido para efectos del muestreo en 10 sitios, de los cuales se extrajeron 91 núcleos orientados (ver Fig. 6). A continuación se lista el número de muestras que se extrajeron por sitio:

Sitio	Nº de Muestras
1	16
2	5
3	9
4	7
5	14

Sitio	Nº de Muestras
6	8
7	6
8	13
9	8
10	5
	<hr/>
	Total 91

Del total de estas muestras, se desecharon 13 por estar la roca intemperizada y fracturada, quedando un total de 78.

El sitio 1 es el sitio de más fácil acceso, por encontrarse al principio del cañón (barranca), además ahí la Formación Alquitrán está al descubierto porque la roca de ésta se utilizó como material de construcción para la presa y su explotación fue a cielo abierto.

Los demás sitios muestreados se encuentran a lo largo de la Barranca del Toro, su acceso se dificultaba por las irregularidades en la topografía y en varias ocasiones por cascadas producto de estas irregularidades.

La presencia del río en el cañón facilitó en un alto porcentaje el abastecimiento de agua utilizada en la perforación para lubricar la barrena y evitar el calentamiento de los núcleos, ya que puede alterar la magnetización remanente de la roca, pues al calentarse y enfriarse en presencia del campo geomagnético, puede haber una nueva orientación de los minerales de las muestras (MRp) y éstas ya no serían representativas de la formación a la que pertenecen.

T A B L A I

COMPARACION DE METODOS DE MUESTREO

Método	Muestreo de Bloques	Perforación en el Campo
Características		
Precisión en la		
Orientación	2° a 3°	1° a 1.5°
Equipo Requerido	Instrumento para orientar: brújula magnética o solar, teodolito. Se puede usar también un tripode de acrílico.	Perforadora con barra de núcleo de diamante, motor de gasolina y aceite, agua.
	Instrumento de Corte: martillos, marros y cincelos.	Instrumento para orientar y extraer núcleos (no magnéticos)
	Plumas de tinta indeleble.	Plumas de tinta indeleble.
Costo del Equipo	Menor	Mayor
Peso del Equipo	Menor	Mayor
Peso de Muestras Colectadas	Mayor	Menor
Tiempo de Trabajo de Campo.	Menor	Mayor
Tiempo de Trabajo de Laboratorio.	Mayor	Menor
Otras Características	Facilidad en el Muestreo en lugares elevados o falta de apoyo.	Muestras menos im- temperizadas o frag- turadas. Colección más uniforme. Mue- stras de posiciones más profundas.

Es importante señalar que este tipo de roca es de poca resistencia al intemperismo, por lo que se encuentra alterada y fracturada a lo largo del cañón y de la sierra que forma, por lo que no fue posible muestrearla en las partes altas del Cerro del Toro, sino sólo en el cañón, donde el río al formar su cauce la corta y la expone.

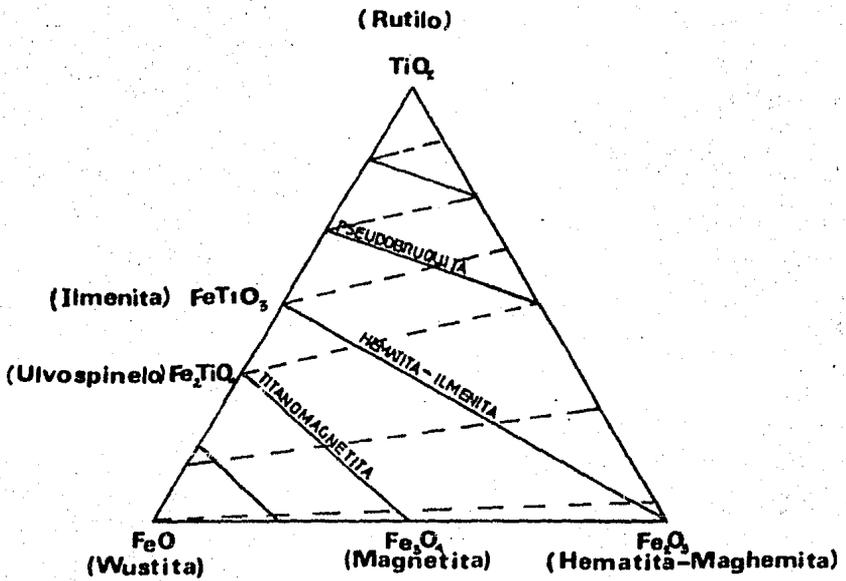
Esto dificultó mucho la selección de los sitios pues eran pocos los lugares en los que la roca estaba sana. Por esta razón los núcleos extraídos tuvieron una longitud máxima de 10 cm y una mínima de 2 cm.

En la orientación de las muestras se utilizó un aparato que hace la función de brújula e inclinómetro (ver figura 16-A).

En el caso de roca fuertemente magnética o de magnetización reversa, es conveniente usar una brújula solar.

Para tener un mejor control de la zona estudiada, se muestrearon dos sitios localizados al NE de la barranca del Toro, donde aflora la Formación Agua de Obispo, el número de muestras colectadas ahí fue de 16.

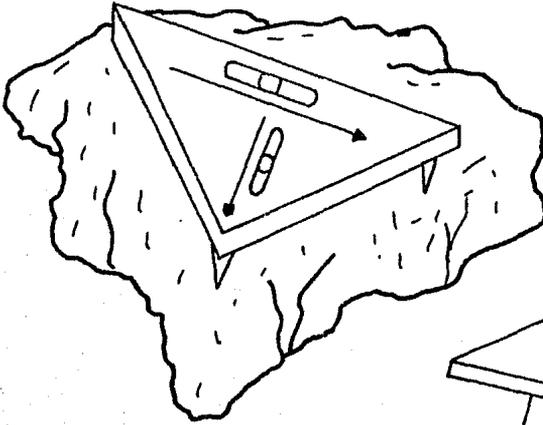
FIG.16



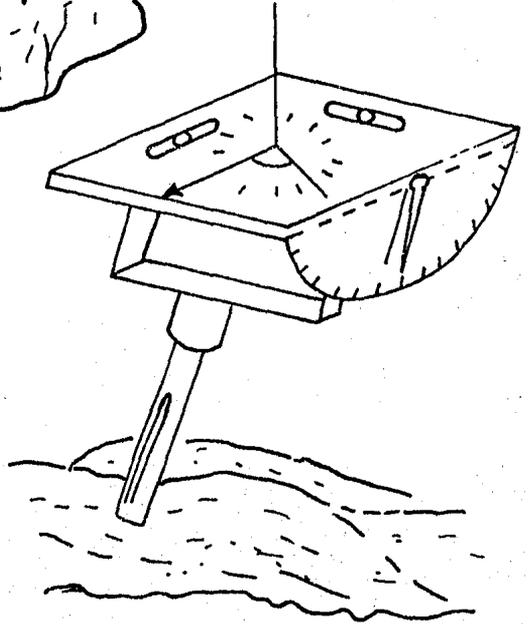
Sistema Ternario de Composición

Química $FeO-TiO_2-Fe_2O_3$

FIG. 16-A



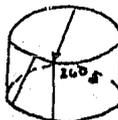
**Dispositivo para
orientar muestras
de mano**



**Dispositivo para
orientar núcleos**



**Corte de especímenes
y transferencia de
marcas de orientación**



Sitio	N° de Muestra	Observaciones
1	12	Roca rosa con textura aparentemente
2	5	eutaxítica, fragmentos de roca y pómez aplastados en algunas partes en una matriz posiblemente vítrea.
3	10	Roca color rojiza, se observan algunos fragmentos de roca en una matriz vítrea, posiblemente hematizada. Es probable que se trate de la parte más soldada del flujo
4	7	Roca color rosado con textura eutaxítica. Presenta fragmentos de roca y de pómez aplastados en algunas partes.
5	14	Matriz vítrea.
6	7	Toba riolítica de color blanco con líticos y fragmentos de pómez que tienen un tamaño aproximado de 1 a 6 mm.
7	6	
8	8	En este sitio las muestras correspondieron unas de ellas a la toba riolítica blanca de los sitios 6 y 7; y otras muestras (74 a la 78) a la roca rosa, que es otra de las partes del flujo.
9	9	Color rosado, con textura eutaxítica
10	5	y fragmentos de roca y de pómez aplastados. Matriz vítrea.

V.2 Trabajo de Laboratorio.-

V.2.a Preparación de las Muestras.-

Como ya se había dicho anteriormente el método que se utilizó para obtener las muestras fue el de perforación, lo cual facilita el trabajo, sobre todo en el laboratorio, ya que las muestras son cilindros (núcleos), los cuales son cortados en el laboratorio en especímenes (pequeños discos cilíndricos).

Las marcas de orientación y referencia que se hacen en el campo, deben transmitirse a los especímenes como se indica en la figura 16-A. El tamaño de cada uno de estos especímenes fue de aproximadamente 2.2 cm.

V.2.b Análisis de la Estabilidad del MRN.-

El estudio de la estabilidad del MRN es fundamental en paleomagnetismo, de aquí que estos estudios han recibido siempre una constante atención.

El hecho de la existencia de rocas con alta estabilidad magnética es una de las bases del paleomagnetismo, sobretodo porque en todo estudio de este tipo se requiere una correlación con la escala del tiempo y el MRN útil es aquel que guarda un registro fiel del campo geomagnético de un tiempo dado desconocido.

Una consideración básica aquí, es que la magnetización remanente natural es capaz de permanecer invariable en el

transcurso del tiempo (al menos desde su origen al tiempo de observación). Para comprobar que el registro magnético es válido, se han elaborado gran número de pruebas, éstas se pueden agrupar en dos divisiones principales: Pruebas de Campo y Pruebas de Laboratorio.

Pruebas de Campo:

Entre estas pruebas se tienen: la del plegamiento, del conglomerado, del contacto quemado, de magnetizaciones remanentes reversas, de consistencia (Graham 1949, Cox y Doell 1960, Wilson 1962).

Pruebas de Laboratorio:

Sirven para analizar la estabilidad magnética y separar los diversos componentes de MRN y son: Desmagnetización por campos magnéticos alternos decrecientes (OMAD) (As y Zijderveld 1958, Crecy 1959); Desmagnetización por altas temperaturas (Irving et al 1961, Wilson 1962); Desmagnetización por tratamiento químico (Carmichael 1961, Collinson 1963); Desmagnetización por bajas temperaturas (Ozima et al 1964).

Se tienen también las pruebas concernientes a las propiedades magnéticas, como son: el espectro de fuerzas coercitivas; temperaturas de Curie y de bloqueo; tiempo de relajación; coeficiente de K_{ennig}berger; susceptibilidad y anisotropía magnética.

V.2.c Medición del Magnetismo Remanente Natural.-

Una vez que se tienen los especímenes debidamente marcados, se procede a realizar la medición del MRN de éstas. Para esto se utilizó un magnetómetro de puerta de flujo, el cual tiene un detector constituido esencialmente de un núcleo de material magnético con alta permeabilidad en campos magnéticos débiles.

La medición resultó relativamente fácil debido a que el MRN que se presentó en las muestras tenía una intensidad considerablemente alta (intensidades del orden de 20 - 40 divisiones), salvo algunas ocasiones donde las muestras por estar un poco intemperizadas tenían una baja intensidad en su MRN (del orden de 2 - 4 divisiones).

Los datos obtenidos de estas mediciones fueron procesados con diferentes programas que realizaron las correcciones de campo así como la obtención de los parámetros estadísticos y direcciones medias de MRN.

V.2.d Desmagnetización por Campos Magnéticos Alternos Decrecientes.-

Este proceso de desmagnetización al que se someten las muestras, sirve para analizar la estabilidad del magnetismo remanente y sobre todo el magnetismo remanente primario.

Consiste en aplicar etapas progresivas de un campo magnético alterno en forma decreciente, sobre el espécimen que se encuentra en rotación, esto elimina los momentos magnéticos

del MEN de acuerdo a su dureza y en forma proporcional a la intensidad máxima del campo aplicado.

Es de vital importancia que al efectuarse la desmagnetización, los especímenes estén bien aislados sobre todo de la presencia de campos magnéticos directos, ya que esto generaría un magnetismo remanente anisotrópico como se menciona en el capítulo II.

La resistencia magnética que se presenta en una roca a la desmagnetización se le llama dureza magnética y esta depende de las fuerzas coercitivas de sus dominios, los cuales a su vez dependen del tamaño, forma y alineamiento de los granos, así como de la clase de material y de sus imperfecciones cristalinas.

A la magnetización remanente que más resiste se le llama dura (estable) y a la que desaparece fácilmente se le llama blanda (inestable).

Como la magnetización remanente natural de una roca es en el caso más general la resultante de varias MR primarias y secundarias (MR_p y MR_s) con diferentes magnitudes y direcciones, en este proceso de desmagnetización la dirección y la intensidad del MR puede cambiar después de cada etapa de lavado.

En ésta prueba se utilizó una muestra representativa de cada sitio, a las que se les llamó muestras piloto y que fueron 10 en total.

Para tener bien establecido el comportamiento de los especímenes, después de aplicar éste método se realizaron una serie de gráficas para las muestras desmagnetizadas. En ellas se grafican J_i/J_0 donde J_0 es la intensidad antes de la des-

magnetización y J_i es la intensidad obtenida en las diversas etapas de desmagnetización.

V.2.e Desmagnetización Térmica.-

Este tipo de prueba se llevó a cabo en el laboratorio con un desmagnetizador térmico marca Schonstedt que tiene las siguientes características: a) Una unidad de control donde se varían temperaturas a las que se desea calentar la muestra (temp. $0^{\circ} - 900^{\circ}C$). b) Una unidad de calor (horno) donde las muestras son calentadas, esta unidad se encuentra bien aislada de cualquier campo magnético. c) Una unidad de enfriamiento, donde se colocan las muestras aisladas del campo geomagnético para que al enfriarse no adquieran ningún tipo de magnetización térmica parcial.

El MRT adquirido en un determinado rango de temperaturas es independiente del adquirido en otro intervalo de temperaturas diferentes, por lo que el magnetismo remanente térmico total (adquirido entre la temperatura de Curie y la ambiental) es la suma de varios MRT parciales (MRTp); a esto se le conoce como la ley de adición del MRTp (Thellier, 1951).

En este proceso de desmagnetización las muestras son sometidas a altas temperaturas, comenzando desde $100^{\circ}C$ hasta $400^{\circ}C$, durante cada etapa de calentamiento y enfriamiento se les mide nuevamente la intensidad y dirección del MR hasta alcanzar su temperatura de bloqueo que es donde pierden su MR.

Durante la prueba se eliminaron varias veces las diferentes MRTp, lo que ocasiona que al medir su MRT, este tenga cam-

bios de dirección y de intensidad.

Este comportamiento se analiza mediante gráficas que se hacen de cada muestra piloto; en nuestro caso se analizaron 10 muestras.

V.2.f Interpretación Paleomagnética.-

En paleomagnetismo se trabaja con una serie de datos que corresponden a las muestras, estos incluyen las propiedades de los vectores de magnetización, las posiciones de los polos paleomagnéticos y las propiedades magnéticas de las rocas; todas estas propiedades están afectadas por una gran diversidad de fenómenos, por lo que se necesita un análisis estadístico con una interpretación adecuada que caracterize las propiedades de las muestras de un lugar determinado, a las que se les denomina población.

Tenemos que dentro de los métodos utilizados para caracterizar una población se encuentran los de tendencia central, de dispersión, de asimetría y de exceso, pero los que más se usan son los dos primeros.

Las medidas de tendencia central utilizan la media, la mediana y la moda. Las medidas de dispersión utilizan el rango, la variancia, la desviación estándar, el coeficiente de variación y la covariancia.

En nuestro caso para caracterizar los vectores de magnetización necesitamos conocer la declinación, la inclinación y la intensidad.

Para este estudio se aplicó el método más empleado en paleomagnetismo que es el de Fisher (1953); éste se basa en que, en forma aproximada, se puede suponer a los vectores de magnetización distribuidos en la superficie de una esfera, por lo que se le conoce como distribución esférica.

En este método se asume que las direcciones de los vectores de MRN de los distintos especímenes, al representarse como puntos sobre la superficie de una esfera se distribuyen con la función de probabilidad dada por:

$$P_{\psi} d\psi = \frac{k}{4 \sinh k} e^{k \cos \psi}$$

Donde:

ψ es el ángulo entre la dirección de la muestra y la dirección verdadera.

k es el parámetro de precisión que indica la agrupación de las direcciones; si es cero, las direcciones están al azar (uniformemente distribuidas sobre la superficie esférica) y mientras más alto sea su valor, mayor será la agrupación de las direcciones.

La dirección media de cada muestra está determinada por la declinación D y la inclinación I ; esta dirección queda determinada por sus tres cosenos directores que son:

$$l = \cos (D) \times \text{Sen } (I) \quad \text{componente norte}$$

$$m = \text{Sen } (D) \times \text{Cos } (I) \quad \text{componente este}$$

$$n = \text{Sen } (I) \quad \text{componente de inclinación}$$

la resultante de estos componentes es igual a la suma vectorial y se expresa de la siguiente manera:

$$R^2 = (\sum l_i)^2 + (\sum m_i)^2 + (\sum n_i)^2$$

La dirección media se puede calcular de:

$$D = \text{tg}^{-1} \frac{\sum m_i}{\sum l_i} ; \quad I = \text{Sen}^{-1} \frac{\sum n_i}{R}$$

donde;

D = Declinación media ; I = Inclinación media

y donde el parámetro " K " se estima mediante:

$$k = \frac{N - 1}{N - R}$$

donde N = número de direcciones estudiadas.

Para poder estimar el grado de dispersión es posible calcular el semiángulo (α) alfa, de un cono circular situado alrededor de R que agrupe los puntos a un nivel de confianza dado, el cual según Fisher (1953), cuando k es mayor que tres, viene dado por:

$$\alpha_{(1-P)} = 1 - \frac{N-R}{R} \left\{ \left(\frac{1}{P} \right)^{1/(N-1)} - 1 \right\}$$

Generalmente en los estudios paleomagnéticos convencionales P es tomado a 0.05, lo que proporciona un cono de confianza del 95%.

El grado de dispersión también es especificado por el radio (en grados) de círculos con centro en la media verdadera y que contengan el 50%, 63% y el 95% de las direcciones, estos se determinan por:

$$\Theta_{50} = \frac{67.5}{(k)^{1/2}} \quad (\text{grados})$$

$$\Theta_{63} = \frac{81}{(k)^{1/2}} \quad (\text{grados})$$

$$\Theta_{95} = \frac{140}{(k)^{1/2}} \quad (\text{grados})$$

Estos parámetros representan respectivamente el error probable, la desviación estandar circular y el error al 95% de la distribución normal.

VI.- RESULTADOS Y DISCUSION

A continuación se presentan los resultados paleomagnéticos de las Formaciones Alquitrán y Agua de Obispo. La localización de los sitios muestreados se presenta en la figura 6.

Resultados Paleomagnéticos.-

Formación Alquitrán:

Sitio 1

Se encuentra localizado a la entrada de la barranca del Toro, su muestreo fue relativamente fácil porque se aprovechó la cantera (que alguna vez fue explotada), donde la formación esta expuesta y la roca no está intemperizada.

Se obtuvieron 16 núcleos orientados de los cuales se cortaron 14 especímenes. Se les midió su MRN (ver fig. 17 y 18) y se pudo apreciar que existen dos tendencias en las direcciones de magnetización por lo que se dividió en dos grupos.

Sitio 1-A

Los parámetros calculados se pueden ver en la tabla I-A. Se realizó la desmagnetización por CMAD a las muestras 2 y 7, se observa que las curvas de desmagnetización (J_i/J_o) decrecen con el campo aplicado y que cuando la intensidad es de unos 900 Oe la magnetización es menor del 10% del valor inicial (ver fig. 17-A).

Las magnetizaciones presentan campos destructivos medios entre 250 y 300 Oe.

La dirección media de magnetización tiene una declinación de 116.1° y una inclinación de -59.6

Después del lavado magnético por CMAD se volvieron a medir los MRN de las muestras 2 y 7 (ver fig. 17-B).

Sitio 1-B

Los parámetros estadísticos calculados se pueden ver en la tabla I-B.

La dirección media de MRN tiene una declinación de 53° y una inclinación de -76.2

En la fig. 17-C se presentan ejemplos de desmagnetización térmica parcial aplicada a las muestras 3, 11-A y 11-B. De acuerdo a su comportamiento durante el proceso de desmagnetización podemos decir que se trata de minerales de la serie de las titanomagnetitas de composición variable y tamaño de grano variable. (Ver fig. 16).

Sitio 2

Este sitio se localiza en la parte final de la barranca del Toro. Se obtuvieron cinco muestras orientadas, de las que se cortaron cinco especímenes, ya que el tamaño de las muestras era aproximadamente de 4 cm.

Se midió la MRN de los especímenes (ver fig. 19) y se calcularon los parámetros estadísticos; los resultados pueden observarse en la tabla II.

De este sitio no se tomó ninguna muestra para ser desmagnetizada.

La dirección media de magnetización tiene una declinación aproximada de 110.4° y una inclinación de -82.8° . La dispersión en los resultados se debe posiblemente a la intemperización de la roca en este sitio.

Sitio 3

En este sitio se colectaron 9 muestras orientadas de las que se obtuvieron 10 especímenes.

Se midió su magnetización remanente natural (fig. 20) y los parámetros estadísticos calculados se presentan en la tabla III.

Se escogieron las muestras 22 y 28 para desmagnetizarlas por CMAD y se pudo determinar por las curvas J_i/J_0 que la intensidad de magnetización decrece con el campo aplicado, de tal forma que cuando éste es de 800 Oe tenemos una intensidad de magnetización menor al 10% del valor inicial (ver fig.20-A)

Los campos destructivos medios están alrededor de 450 Oe por lo que corresponden a la serie de las titanomagnetitas de composición variable y tamaño de grano variable (fig. 16).

La dirección media del MRN tiene una declinación de 169.2° y una inclinación de -54.3 .

A las muestras desmagnetizadas por CMAD se les volvió a medir su MRN, el resultado se puede observar en la fig. 20-B.

También se realizó desmagnetización térmica parcial a las muestras 24, 26 y 27 cuyo comportamiento se puede ver en la fig. 20-C.

Sitio 4

Se colectaron 7 muestras orientadas que tenían una longitud aproximada de 3 cm (debido a que la roca se encontraba un poco fracturada), por lo que solamente se obtuvo un espécimen de cada una.

A los especímenes se les midió la MRN (ver fig. 21) y se calcularon sus parámetros estadísticos (ver tabla IV).

Se escogió la muestra 36 para ser desmagnetizada por CMAD (fig 21-A) y se pudo apreciar como la intensidad decrece con el campo aplicado, por lo que se establece que pertenecen a la serie de las Titanomagnetitas (ver fig. 16), de composición variable y tamaño de grano variable. Después de la desmagnetización se volvió a medir su MRN (fig. 21-B).

En la fig. 21-C se presenta un ejemplo de desmagnetización térmica parcial efectuada en la muestra 36.

Las magnetizaciones presentan campos destructivos medios de aproximadamente 325 Oe. La dirección media de MRN tiene una declinación de 166.2° y una inclinación de -58.1° .

Como podemos ver en este sitio se presentan inclinaciones negativas, lo que indica una polaridad reversa.

Sitio 5

Se obtuvieron 12 muestras orientadas de las que se cortaron 14 especímenes a los que se les midió su MRN (fig. 22).

Se calcularon los parámetros estadísticos de las muestras del sitio cuyos resultados se pueden ver en la tabla V.

Se efectuó la desmagnetización por CMAD a las muestras 44 y 50, sus gráficas J_1/J_0 se pueden ver en la fig. 22-A

La dirección media de MRN tiene una declinación de 85.5° y una inclinación de -7.8° .

Los campos destructivos medios se encuentran entre los 250 y 300 Oe.

De acuerdo a su comportamiento durante el proceso de desmagnetización estas rocas se clasifican dentro de la serie de las titanomagnetitas (fig. 16).

Al término de la desmagnetización por OMAD se volvió a medir el MRN de las muestras 44 y 50, presentándose los resultados en la fig. 22-B.

Sitio 6

En este sitio se colectaron 8 muestras y se obtuvieron de éstas 7 especímenes. Se les midió su MEN (ver fig. 23) y se calcularon sus parámetros estadísticos (ver tabla VI).

Las intensidades que se presentaron en las muestras, resultaron muy bajas en relación con los demás sitios, además de que el color de la roca es diferente (son de color blanco) por lo que se puede decir que se trata de otro flujo

La dirección media de magnetización tiene una declinación de 172° aproximadamente y una inclinación de -36° aproximadamente.

Sitio 7

Aquí se colectaron 6 muestras de las cuales se cortaron 6 especímenes y se les midió su MRN (fig. 24) y se calcularon los parámetros estadísticos que pueden verse en la tabla VII.

De manera similar al sitio 6, aquí los especímenes tam--

bién mostraron intensidades de magnetización bajas en relación a los demás sitios y el color también varió (color blanco), ya que se trata de otro miembro del flujo (el mismo del sitio 6).

La dirección media de MRN tiene una declinación aproximada de 124° y una inclinación promedio de -50.6° .

De este sitio no se tomaron muestras para ser desmagnetizadas.

Sitio 8

Se colectaron 13 muestras orientadas de las que se cortaron 7 especímenes.

Los resultados de la medición de MRN se presentan en la fig. 25 y los parámetros estadísticos obtenidos se pueden ver en la tabla VIII.

Se tomó la muestra 78 para ser desmagnetizada por CMAD y su comportamiento de acuerdo a las gráficas de J_i/J_o (ver fig. 25-A) muestran que se tratan de minerales de la serie de las titanomagnéticas de composición variable y tamaño de grano variable (fig. 16).

Los campos destructivos medios están alrededor de 300 Oe, la dirección media de magnetización tiene una declinación de -8.6° y una inclinación de 38.9° .

Después del lavado por CMAD se volvió a medir la MRN de las muestras desmagnetizadas, presentándose los resultados en la fig. 25-B.

Se presenta un ejemplo de desmagnetización térmica en la muestra 78, cuyo resultado se ve en la fig. 25-C.

Sitio 9

El número de muestras colectadas aquí fue de 8, de las que se cortaron 9 especímenes. Se les midió su magnetización remanente natural y se pudo observar que existen dos tendencias en las direcciones de magnetización por lo que se dividió en dos grupos: 9-A y 9-B, ver figuras 26 y 27.

Sitio 9-A

Sus parámetros estadísticos pueden verse en la tabla IX-A.

La dirección de magnetización media tiene una declinación de -46.9° y una inclinación de -14.4° .

Sitio 9-B

Se calcularon sus parámetros estadísticos que se pueden observar en la tabla IX-B.

La dirección media de magnetización tiene una declinación aproximada de 19.3° y una inclinación aproximada 13.3°

Se tomó la muestra 80 para desmagnetizarla parcialmente por temperatura, su comportamiento se puede observar en la figura 27-C. Los resultados indican que la roca pertenece a la serie de las titanomagnetitas (ver fig. 16).

Sitio 10

De este sitio se obtuvieron 5 muestras orientadas de las que se cortaron 5 especímenes ya que las muestras eran de un tamaño aproximado de 4 cm.

Se procedió a medir la MRN cuyos resultados se pueden ver en la fig. 28 . También se calcularon los parámetros esta-

dísticos (ver tabla X).

Se escogieron las muestras 89 y 91 para ser desmagnetizadas por CMAD, este comportamiento se puede observar en las curvas J_i/J_o (fig. 28-A). Después de la desmagnetización por CMAD se midió otra vez su MRN, los resultados se observan en la fig. 28-B.

En la fig. 28-C se presenta un ejemplo de desmagnetización térmica parcial realizado en la muestra 88.

Los campos destructivos medios se encuentran alrededor de 300 Oe. La dirección media de MRN tiene una declinación aproximada de -147.3° y una inclinación aproximada de 21° .

Su comportamiento durante el proceso de desmagnetización, nos indica la presencia de minerales de la serie titanomagnetitas como portadores de la magnetización remanente (ver figura 16).

Formación Agua de Obispo:

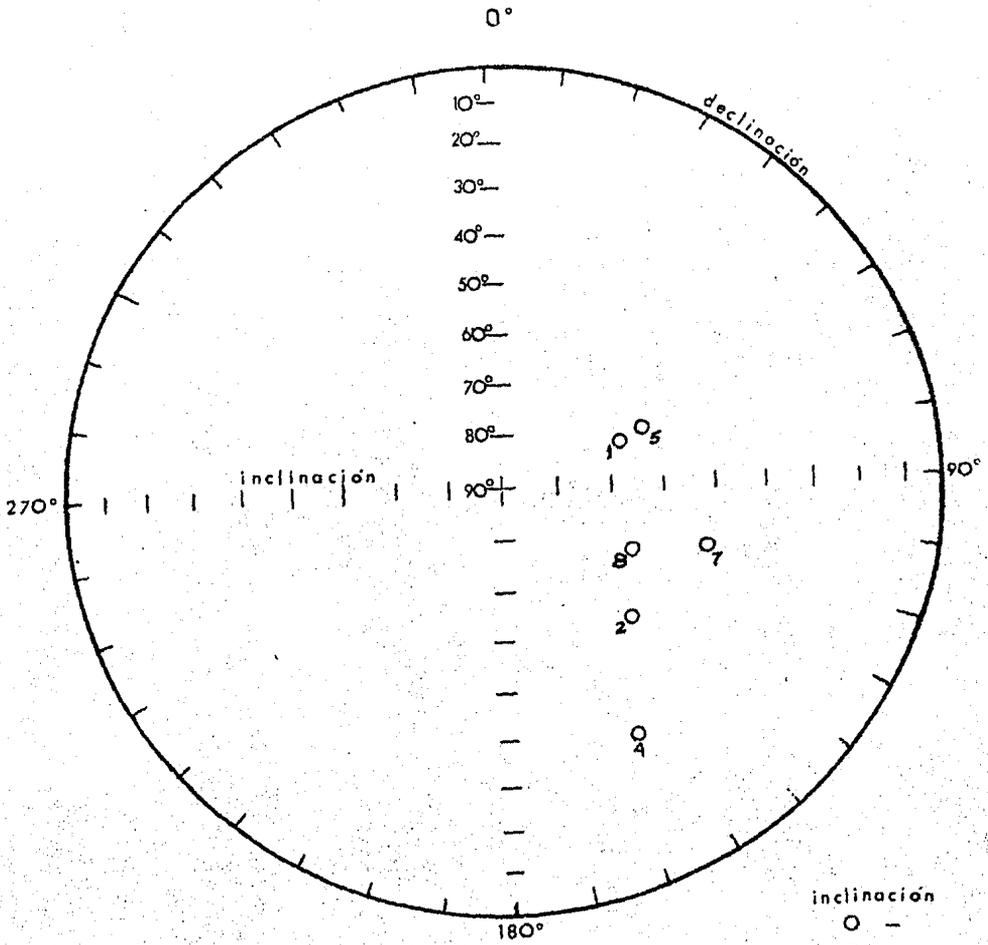
Sitio 1

Este sitio se localiza en la desviación al poblado Agua de Obispo, cerca de la intersección con la carretera 95 México-Acapulco. Se obtuvieron 10 núcleos orientados (muestras N° 148-157), de las cuales dos se fracturaron al cortarse en el laboratorio. La roca está afectada por intemperismo, por lo que no se usaron los especímenes de la parte superficial. Se midió su magnetización remanente natural (MRN) y las direcciones se grafican en la figura 29. Para investigar la estabilidad y la composición vectorial de la MRN se usó desmagnetización por OMAD efectuado en la muestra 149-b (ver fig. 29-A).

Sitio 2

Este sitio se localiza a unos 5 m del anterior. Se obtuvieron 6 núcleos orientados (muestras N° 158 - 163). Las direcciones de MRN se grafican en la fig. 29, junto con las del sitio 1.

Puede observarse que las direcciones están aproximadamente distribuidas a lo largo de un círculo mayor orientado aproximadamente en la dirección Norte-Sur, con algunas direcciones reversas (declinaciones al sur). La distribución es debida a la presencia de magnetizaciones de componentes normales y reversas. Ejemplos de desmagnetización por campos magnéticos alternos decrecientes se presentan en la fig. 29-B, sobre las muestras 158-b y 160-b.



SITIO 1-A

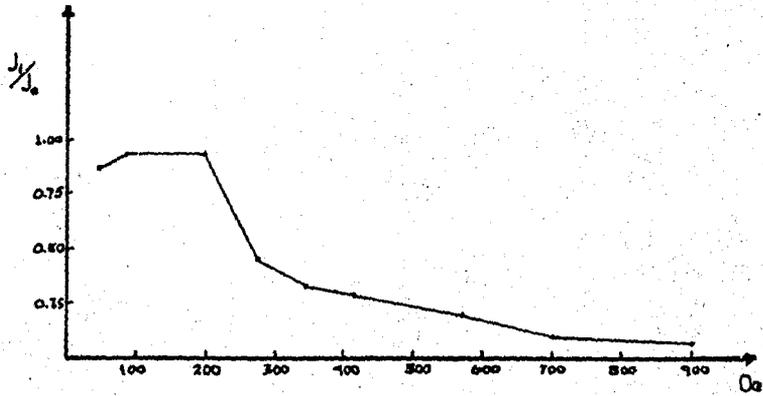
RINCON DE LA VIA GRO.

FIG.17

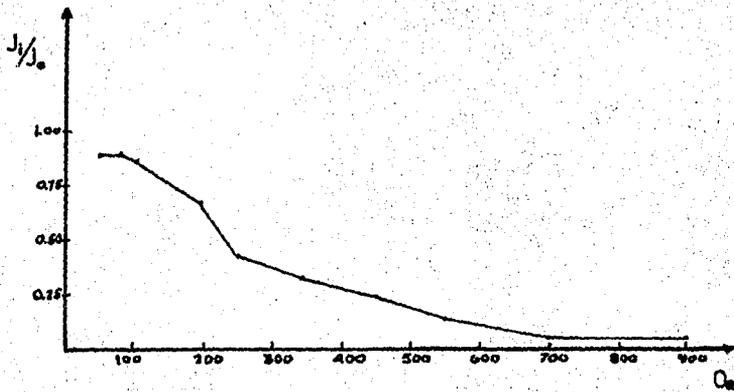
	$R = 5.60$	$\alpha_{95} = 19.65^\circ$
TABLA	$D = 116.07^\circ$	$\theta_{50} = 19.03^\circ$
I-A	$X = -59.61^\circ$	$\theta_{63} = 22.84^\circ$
	$k = 12.58$	$\theta_{95} = 39.48^\circ$
	$N = 6$	

FIG.17A

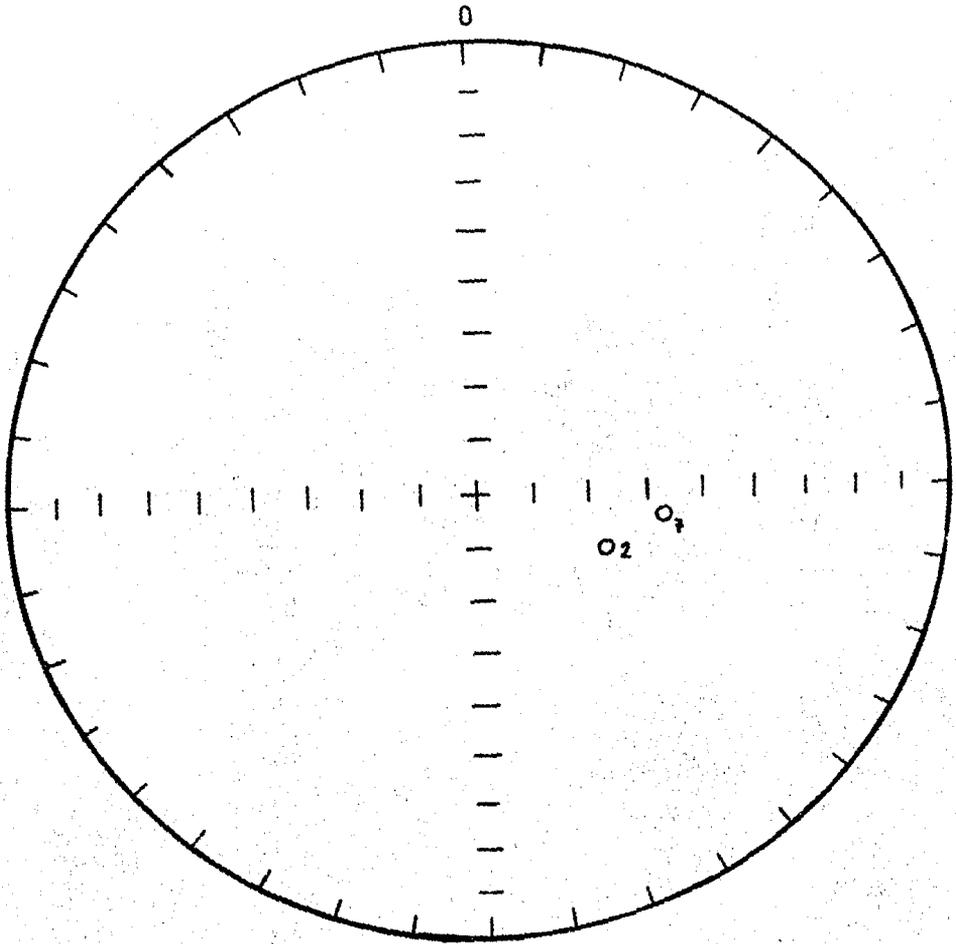
MUESTRA 2



MUESTRA 7



D. C. M. A. D.



SITIO 1

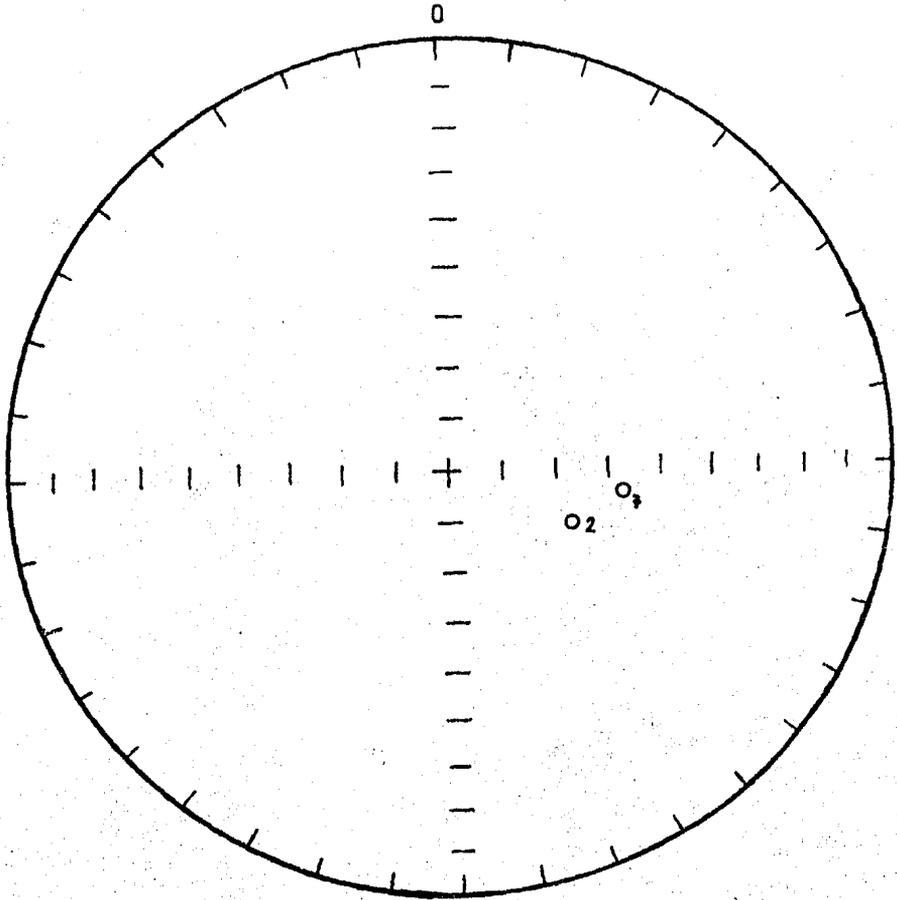
DESMAGNETIZACION POR CAMPOS MAGNETICOS

ALTERNOS DECRECIENTES

(D.C.M.A.D.)

RINCON DE LA VIA GRO.

FIG.17-B



SITIO 1

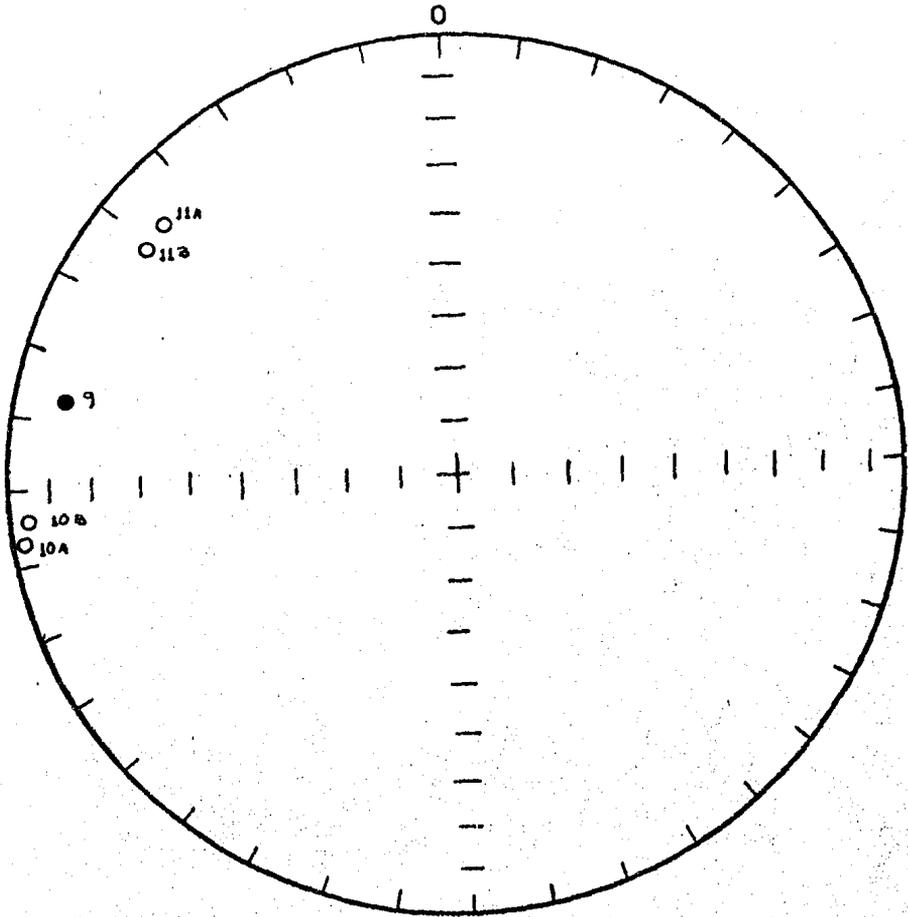
DESMAGNETIZACION POR CAMPOS MAGNETICOS

ALTERNOS DECRECIENTES

(D. C. M. A. D.)

RINCON DE LA VIA GRO.

FIG.17-B



SITIO 1-B

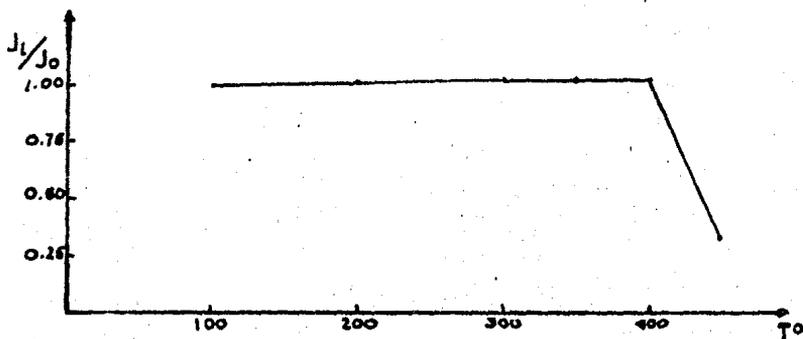
RINCON DE LA VIA GRO.

FIG. 18

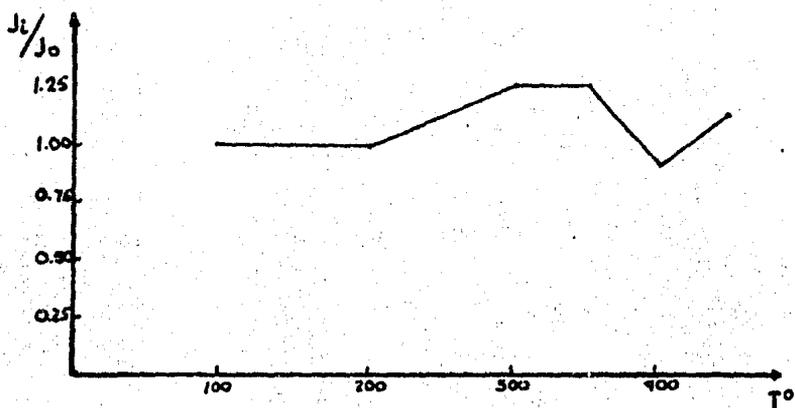
	<u>$R = 5.26$</u>	<u>$\alpha_{95} = 27.78^\circ$</u>
<u>TABLA</u>	<u>$D = -76.21^\circ$</u>	<u>$\theta_{50} = 25.95^\circ$</u>
<u>I-B</u>	<u>$\Sigma = 0.22^\circ$</u>	<u>$\theta_{63} = 31.14^\circ$</u>
	<u>$k = 6.77$</u>	<u>$\theta_{95} = 53.82^\circ$</u>
	<u>$N = 5$</u>	

FIG.18-C

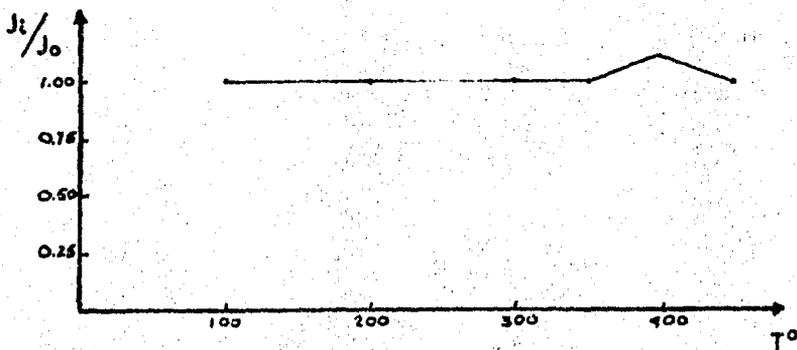
MUESTRA 3



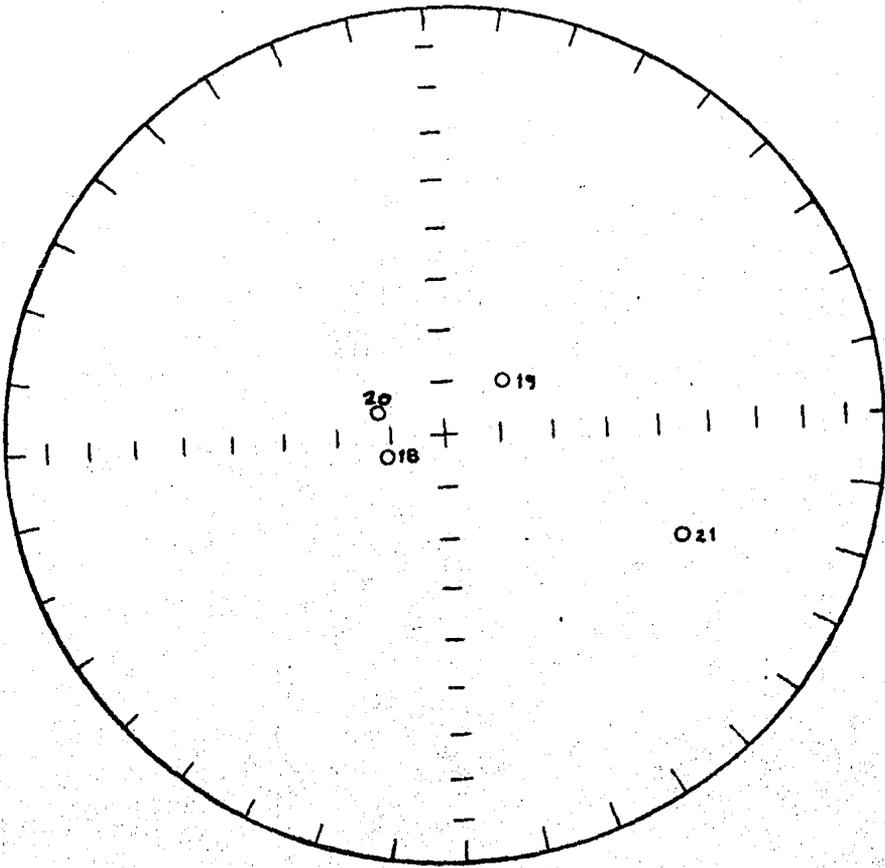
MUESTRA 11-A



MUESTRA 11B



DESMAGNETIZACION TERMICA



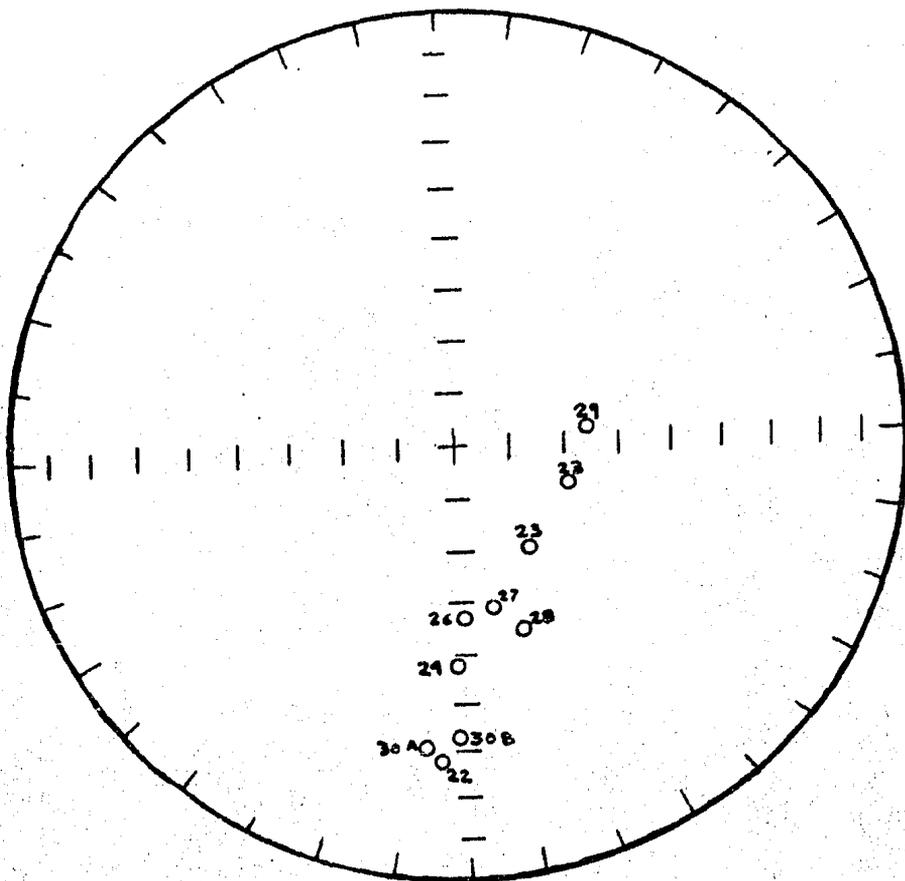
SITIO 2

RINCON DE LA VIA GRO.

FIG. 19

	<u>R = 3.61</u>	<u>$\alpha_{95} = 35.22^\circ$</u>
<u>TABLA</u>	<u>D = 110.36°</u>	<u>$\theta_{50} = 24.21^\circ$</u>
<u>II</u>	<u>$\Sigma = -82.79^\circ$</u>	<u>$\theta_{63} = 29.05^\circ$</u>
	<u>k = 7.77</u>	<u>$\theta_{95} = 50.21^\circ$</u>
	<u>N = 4</u>	

0



SITIO 3

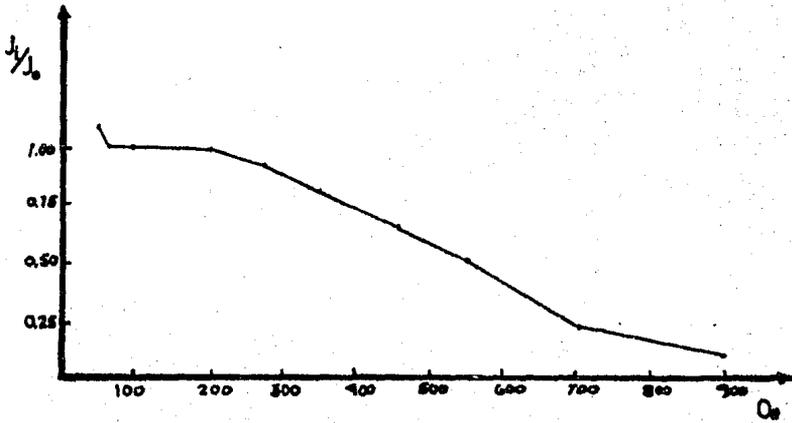
RINCON DE LA VIA GRO.

FIG. 20

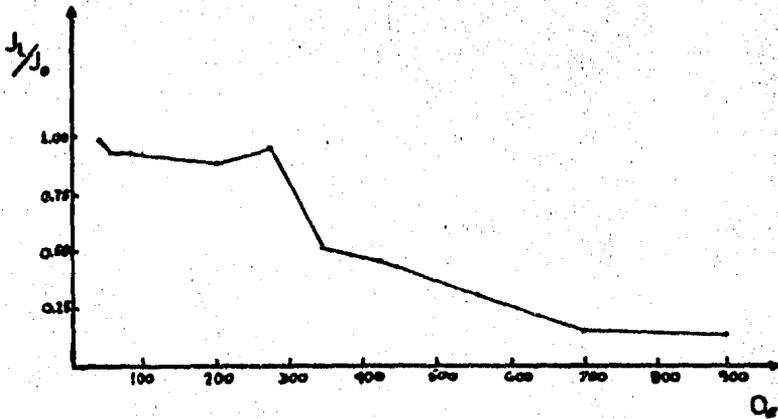
	<u>R = 9.24</u>	<u>$\alpha_{95} = 14.61^\circ$</u>
<u>TABLA</u>	<u>D = 169.17°</u>	<u>$\theta_{50} = 19.57^\circ$</u>
<u>III</u>	<u>E = -54.29°</u>	<u>$\theta_{63} = 23.48^\circ$</u>
	<u>k = -11.90</u>	<u>$\theta_{95} = 40.59^\circ$</u>
	<u>N = 10</u>	

FIG. 20-A

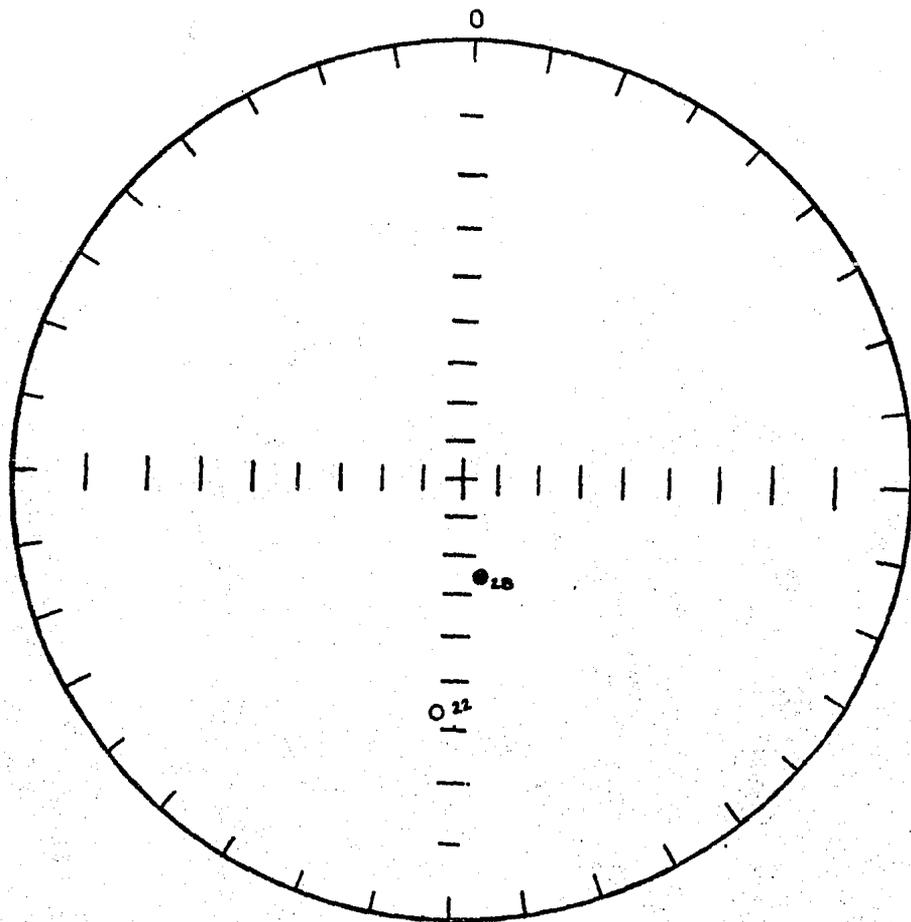
MUESTRA 22



MUESTRA 28



D.C.M.A.D.



SITIO 3

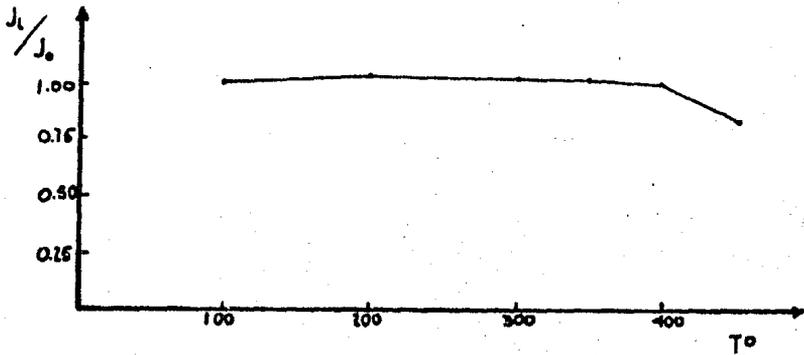
(DCMAD)

RINCON DE LA VIA GRO.

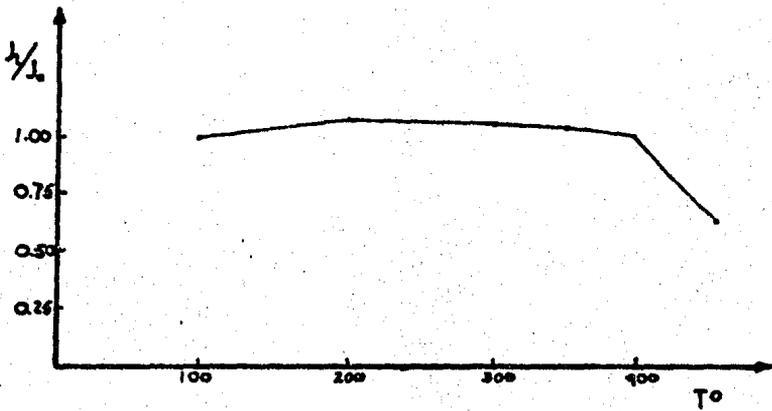
FIG. 20-B

FIG. 20-C

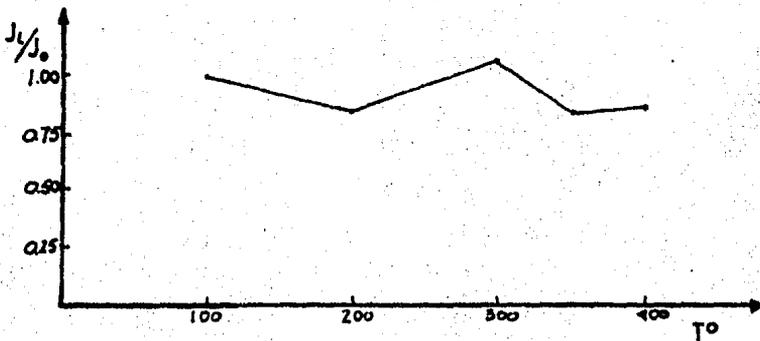
MUESTRA 24



MUESTRA 26

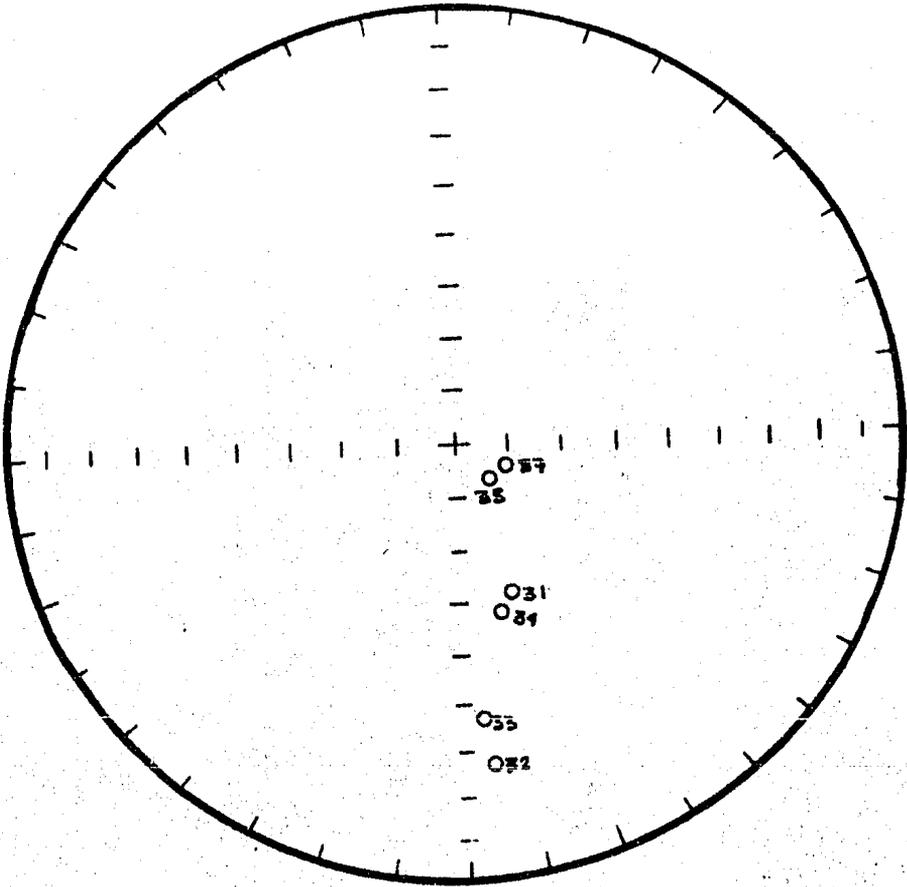


MUESTRA 27



DESMAGNETIZACION TERMICA

0



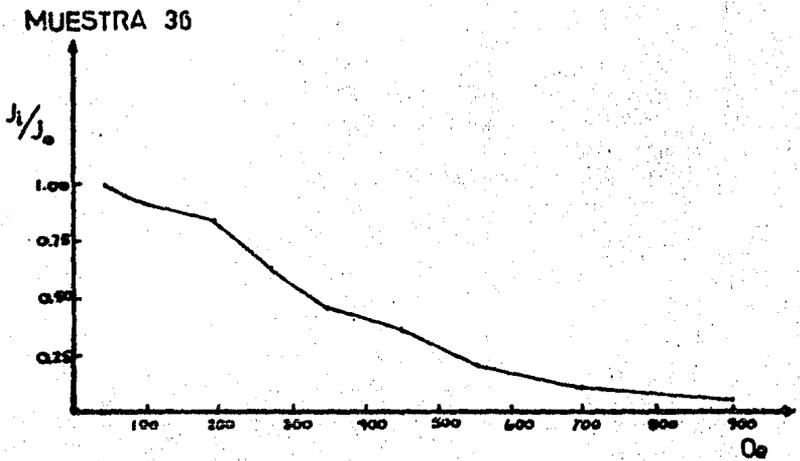
SITIO 4

RINCON DE LA VIA GRO.

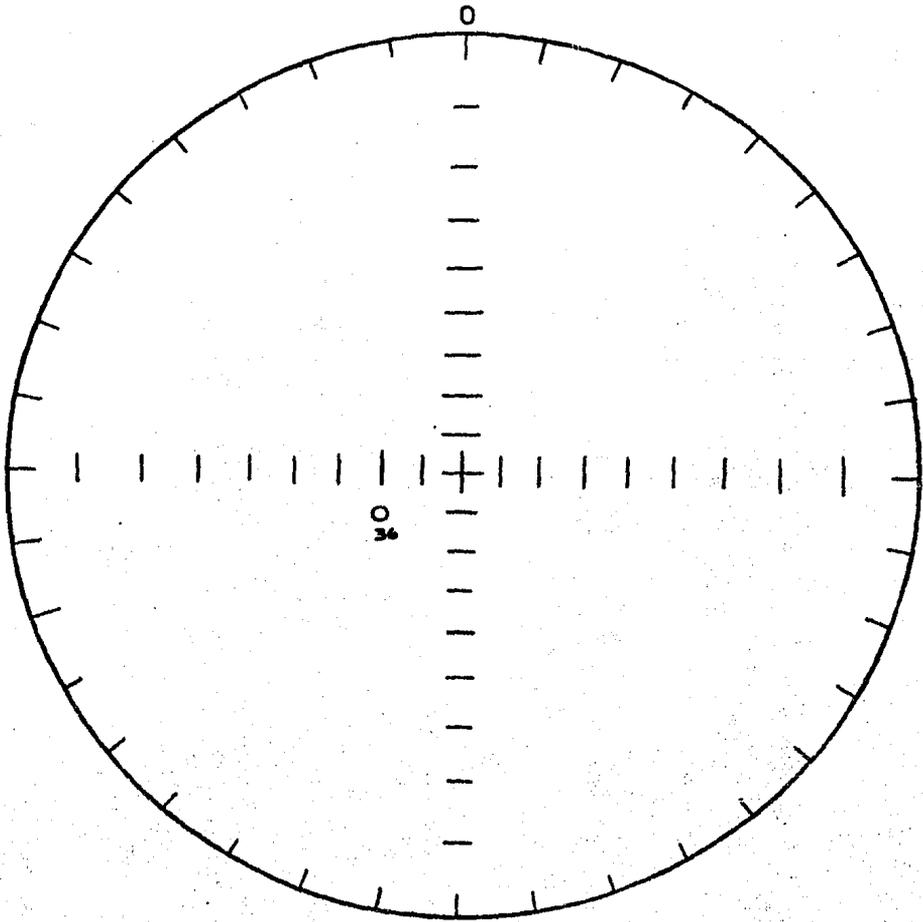
FIG. 21

	<u>R = 5,60</u>	<u>$\alpha_{95} = 20,40^\circ$</u>
<u>TABLA</u>	<u>D = 166,25°</u>	<u>$\theta_{50} = 19,70^\circ$</u>
<u>IV</u>	<u>E = -58,10°</u>	<u>$\theta_{63} = 23,60^\circ$</u>
	<u>k = 11,70</u>	<u>$\theta_{95} = 40,90^\circ$</u>
	<u>N = 6</u>	

FIG. 21-A



D.C.M.A.D.



SITIO 4

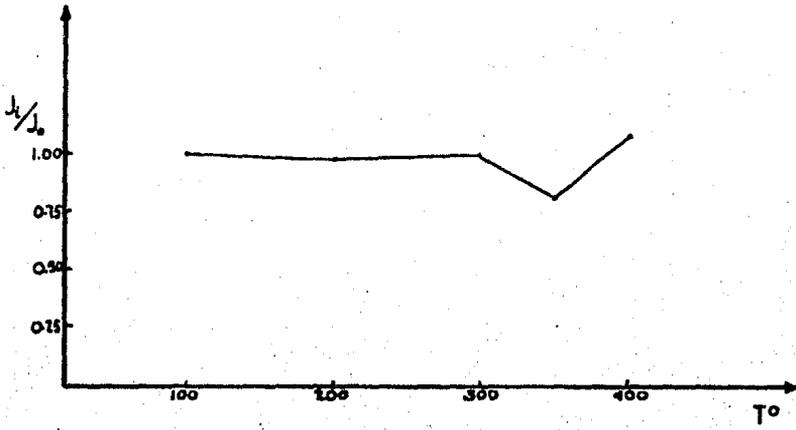
(D.C.M.A.D.)

RINCON DE LA VIA GRO.

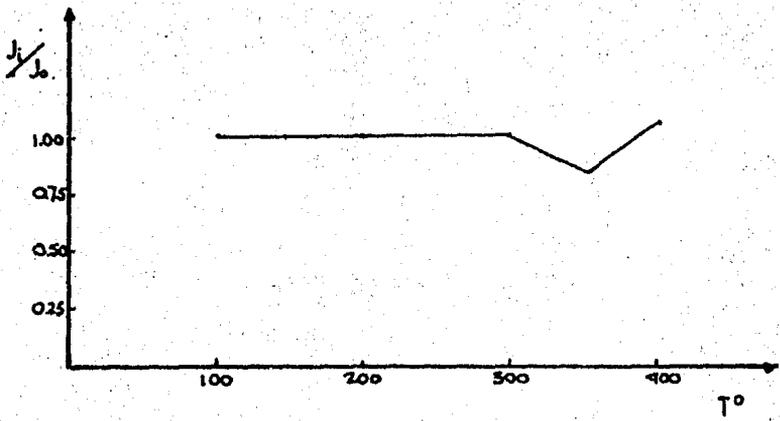
FIG.21-B

FIG. 21-C

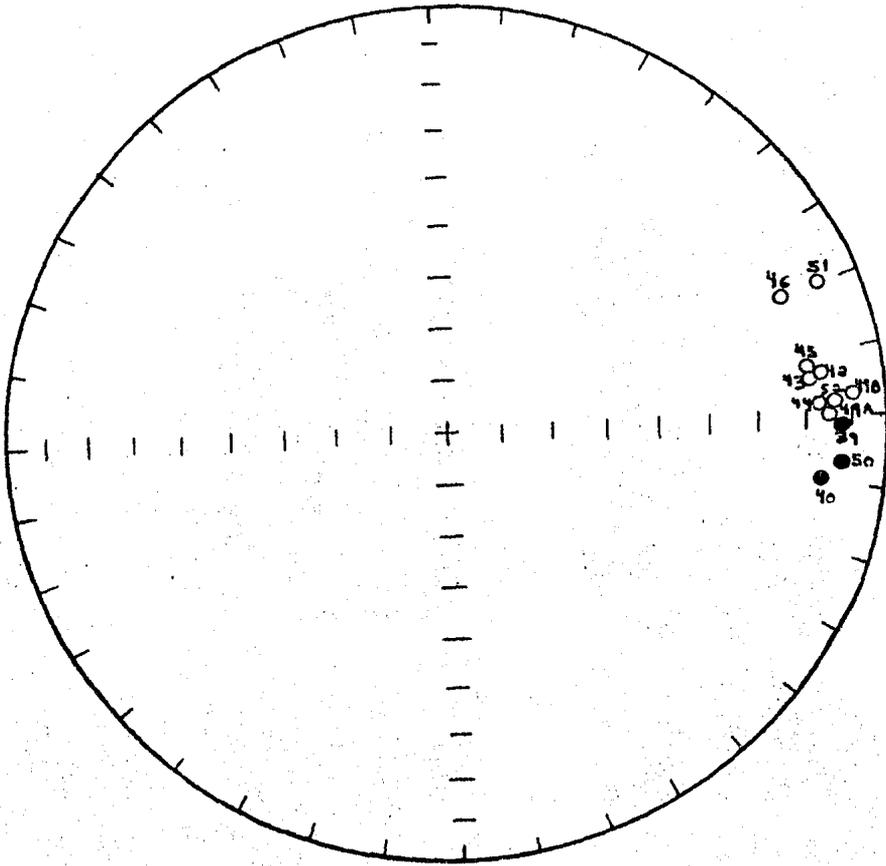
MUESTRA 35



MUESTRA 45



DESMAGNETIZACION TERMICA



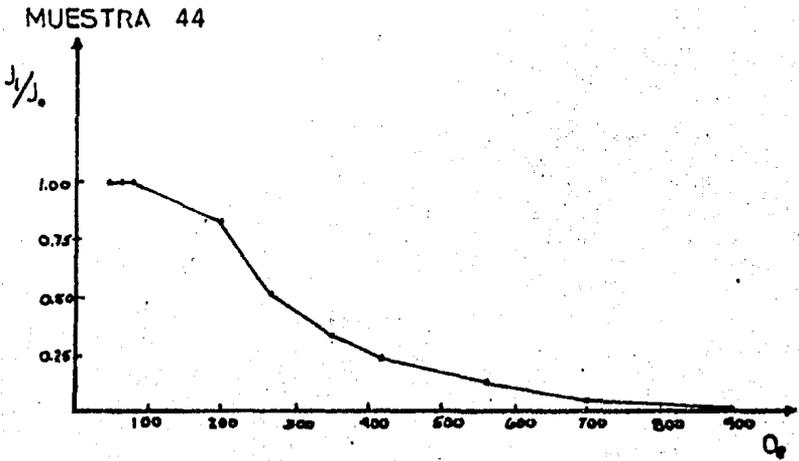
SITIO 5

RINCON DE LA VIA GRO.

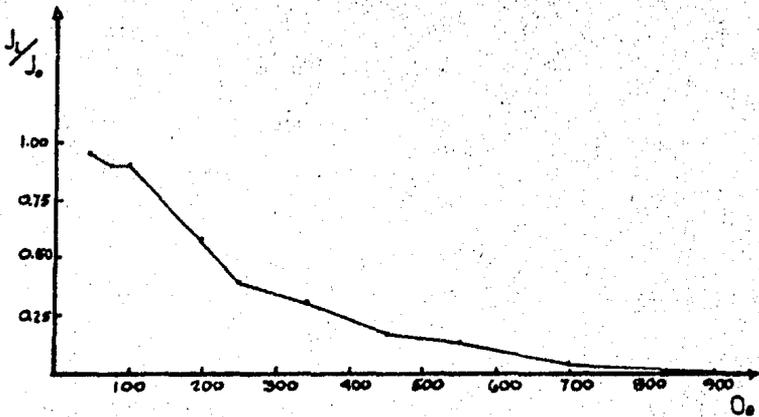
FIG. 22

	<u>R = 10,69</u>	<u>$\alpha_{95} = 8,90^\circ$</u>
<u>TABLA</u>	<u>D = 85,50°</u>	<u>$\theta_{50} = 12,90^\circ$</u>
<u>V</u>	<u>I = -7,80°</u>	<u>$\theta_{63} = 15,50^\circ$</u>
	<u>k = 27,40</u>	<u>$\theta_{95} = 20,70^\circ$</u>
	<u>N = 12</u>	

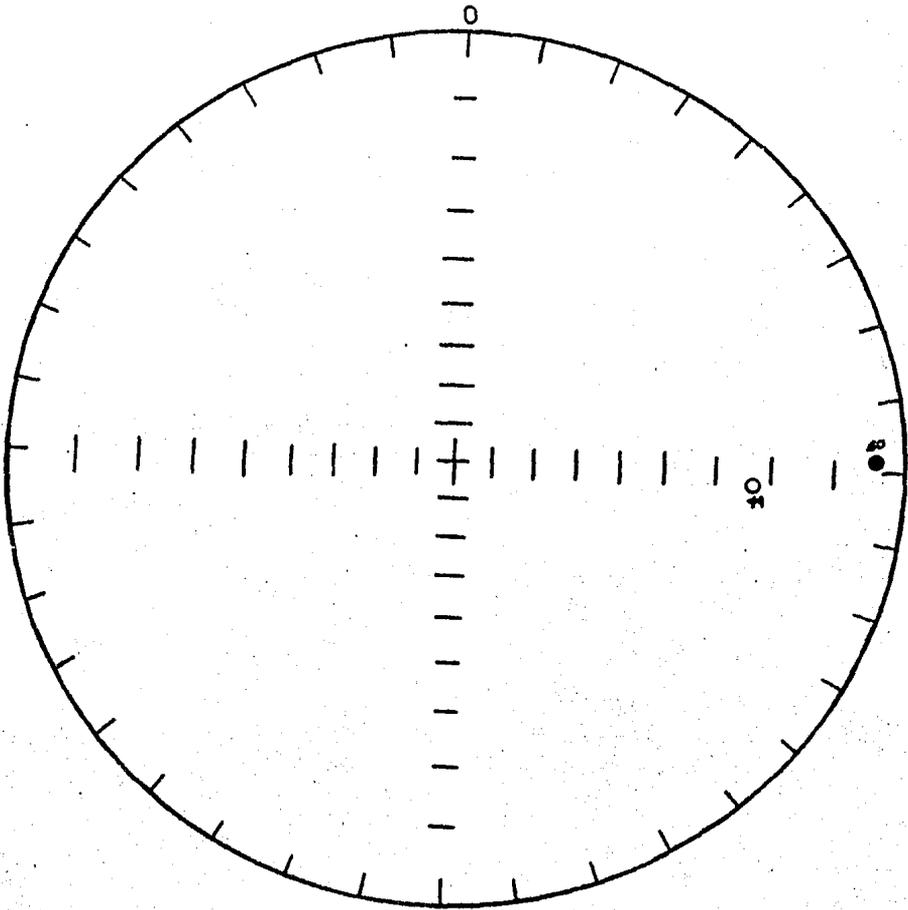
FIG. 22-A



MUESTRA 50



D. C. M. A. D.

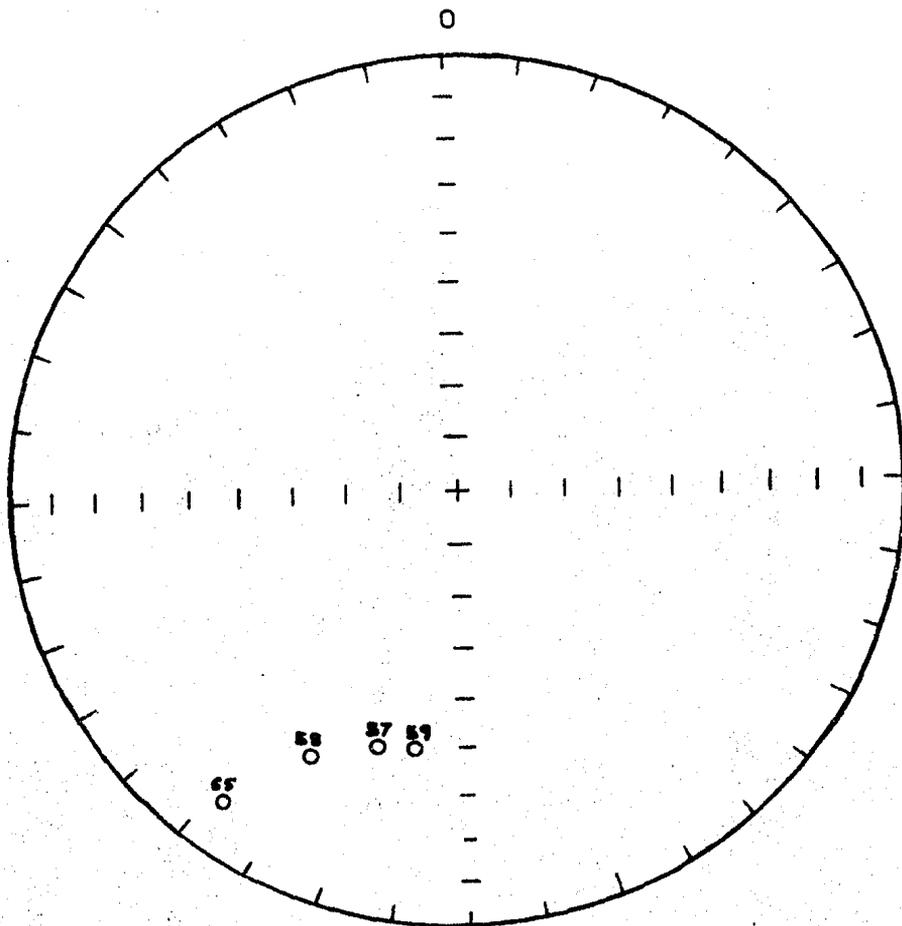


SITIO 5

(D.C.M.A.D.)

RINCON DE LA VIA GRO.

FIG.22-B

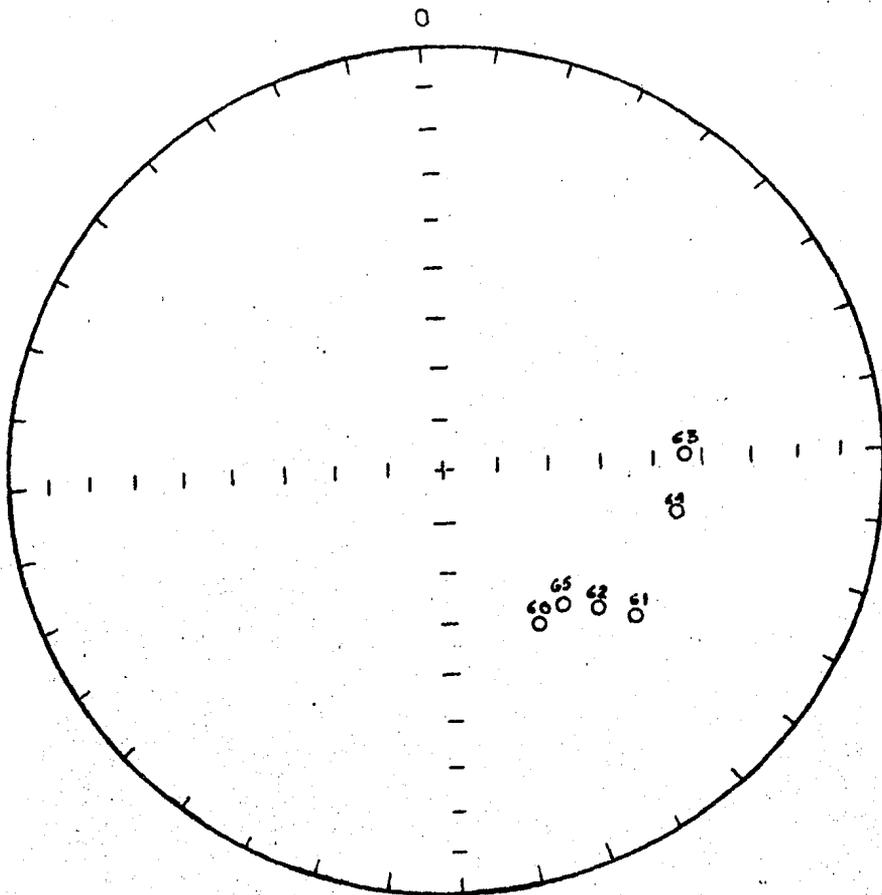


SITIO 6

RINCON DE LA VIA GRO.

FIG. 23

	<u>R = 370</u>	<u>$\alpha_{95} = 51.50^\circ$</u>
<u>TABLA</u>	<u>D = -172.30^\circ</u>	<u>$\theta_{50} = 37.90^\circ$</u>
<u>VI</u>	<u>$\epsilon = -36.60^\circ$</u>	<u>$\theta_{63} = 45.50^\circ$</u>
	<u>k = 3.20</u>	<u>$\theta_{95} = 78.70^\circ$</u>
	<u>N = 4</u>	

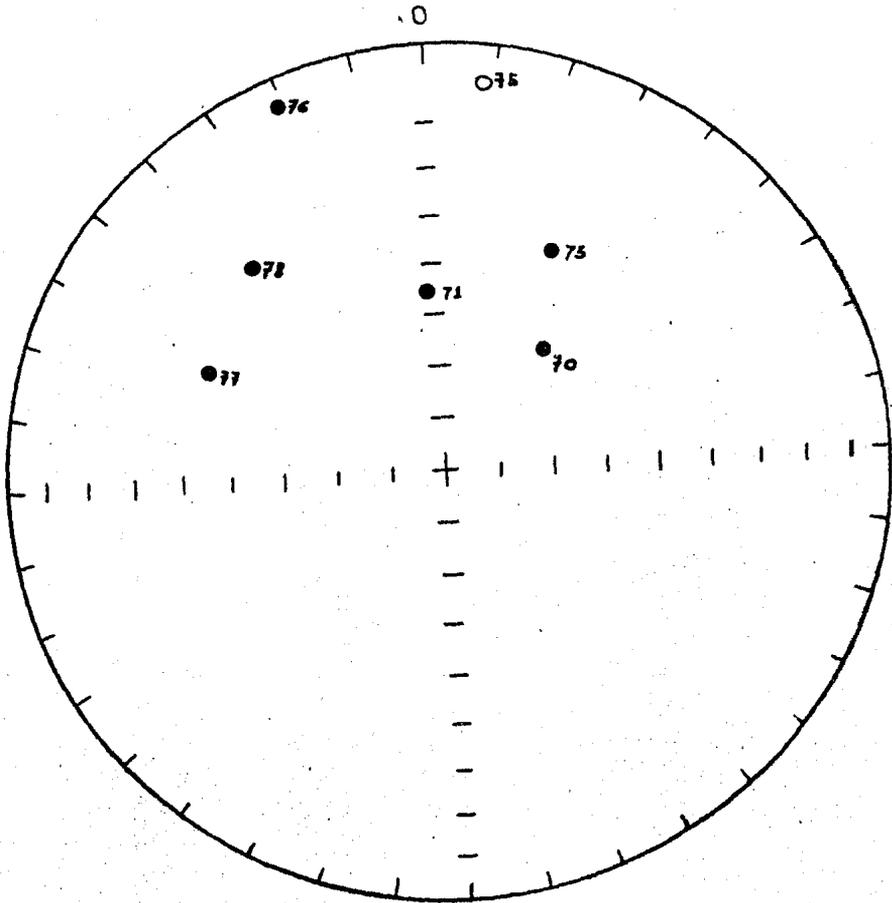


SITIO 7

RINCON DE LA VIA GRO.

FIG.24

	$R = 5.70$	$\alpha_{95} = 14.00^\circ$
<u>TABLA</u>	$D = 124.10^\circ$	$\theta_{50} = 13.90^\circ$
<u>VII</u>	$\Sigma = -50.70^\circ$	$\theta_{63} = 16.60^\circ$
	$k = 23.70$	$\theta_{95} = 28.70^\circ$
	<u>$N = 0$</u>	



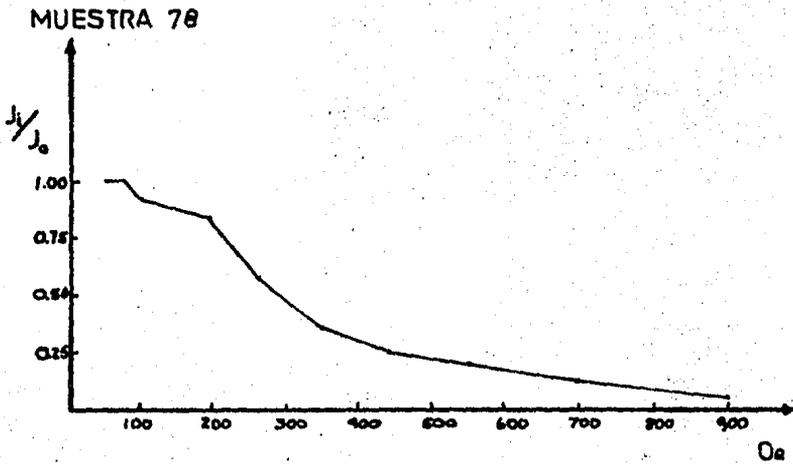
SITIO 8

RINCON DE LA VIA GRO.

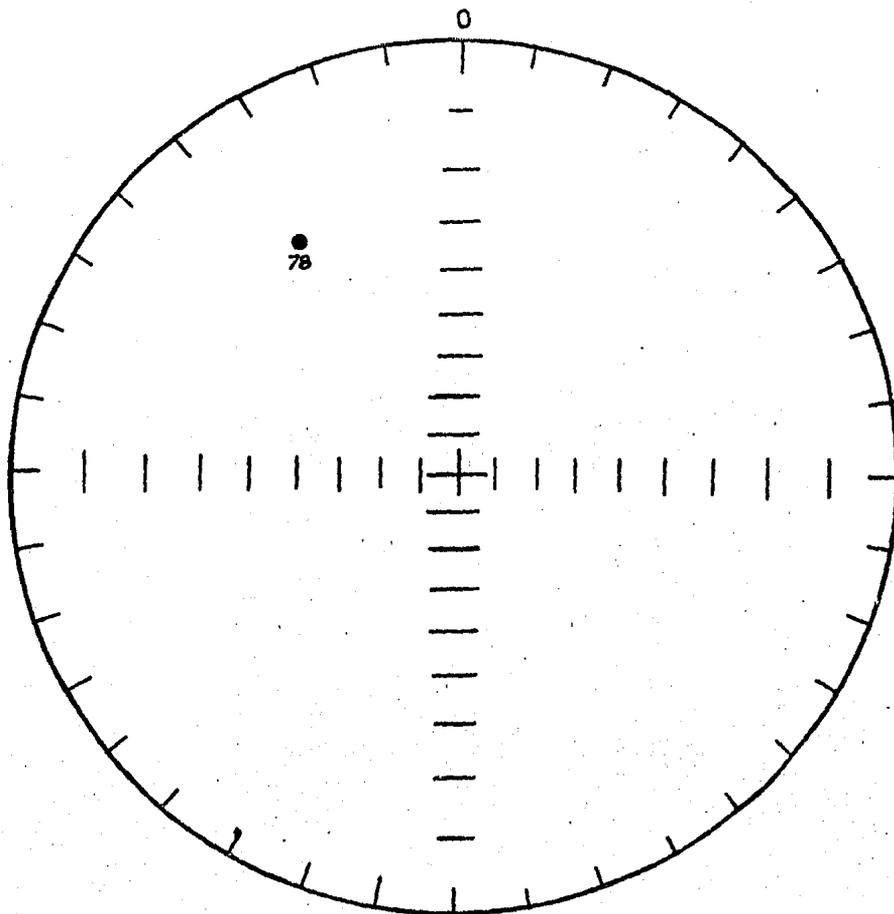
FIG 25

	<u>R = 5.80</u>	<u>$\alpha_{95} = 29.90^\circ$</u>
<u>TABLA</u>	<u>D = -8.60°</u>	<u>$\theta_{50} = 30.10^\circ$</u>
<u>VIII</u>	<u>I = 38.80°</u>	<u>$\theta_{63} = 30.10^\circ$</u>
	<u>k = 5.00</u>	<u>$\theta_{95} = 62.50^\circ$</u>
	<u>N = 7</u>	

FIG. 25-A



D.C.M.A.D.



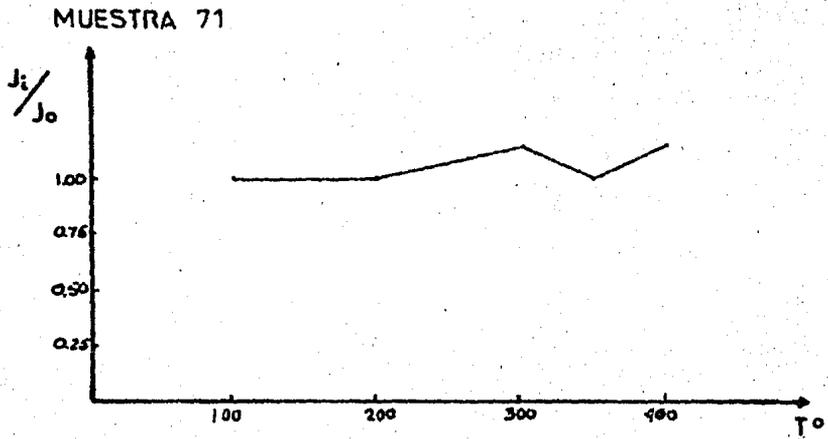
SITIO 8

(D.C.M.A.D.)

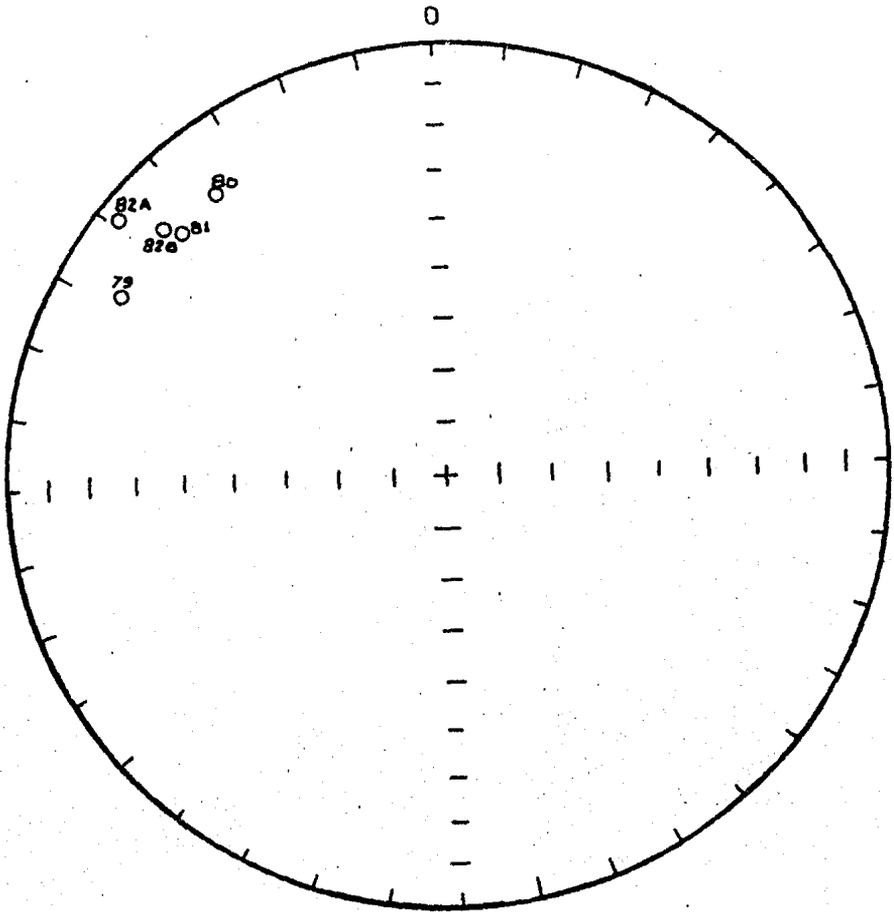
RINCON DE LA VIA GRO.

FIG.25-B

FIG 25 C



DESMAGNETIZACION TERMICA

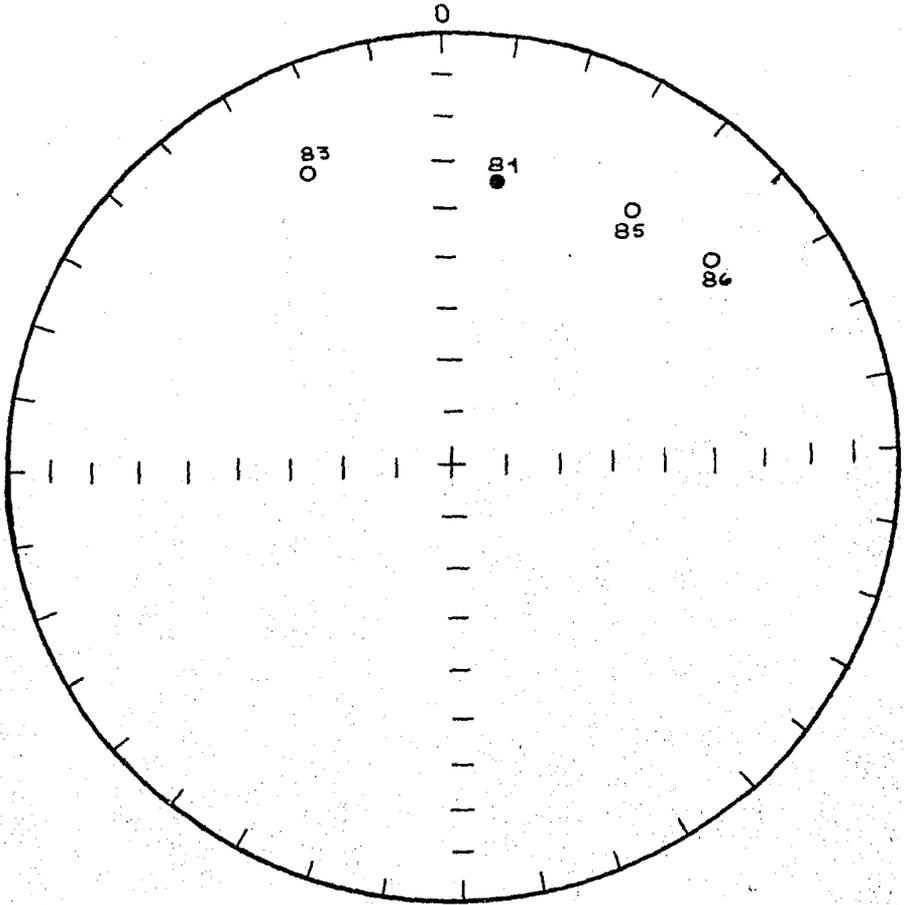


SITIO 9A

RINCON DE LA VIA GRO.

FIG. 26

	<u>R = 490</u>	<u>$\alpha_{95} = 9.50^\circ$</u>
<u>TABLA</u>	<u>D = -46.90^\circ</u>	<u>$\theta_{50} = 8.29^\circ$</u>
<u>IX-A</u>	<u>$\Sigma = -14.30^\circ$</u>	<u>$\theta_{6.3} = 9.90^\circ$</u>
	<u>k = 66.30</u>	<u>$\theta_{95} = 17.20^\circ$</u>
	<u>N = 5</u>	



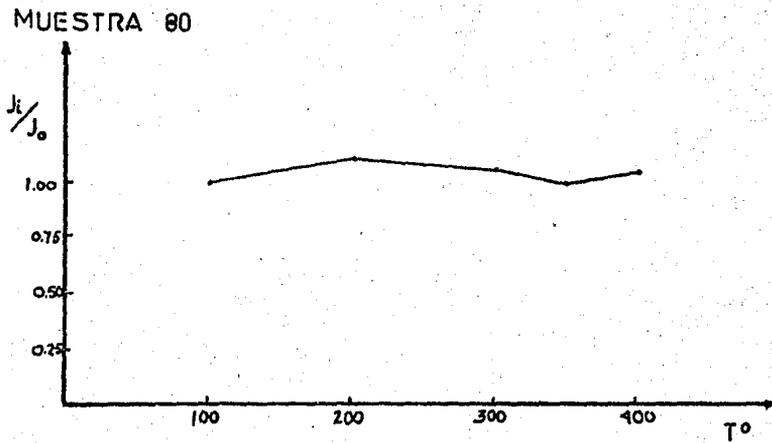
SITIO 9-B

RINCON DE LA VIA GRO.

FIG.27

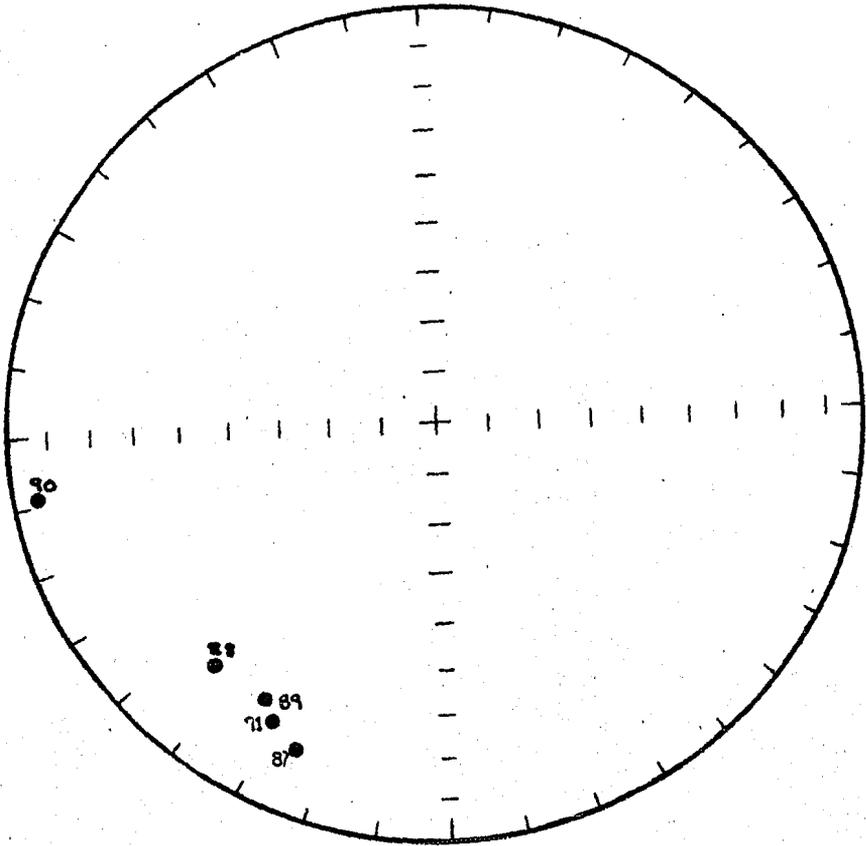
	<u>R=3.20</u>	<u>$\alpha_{95} = 54.90^\circ$</u>
<u>TABLA</u>	<u>D=19.30°</u>	<u>$\theta_{50} = 34.70^\circ$</u>
<u>IX-B</u>	<u>I=13.30°</u>	<u>$\theta_{63} = 41.70^\circ$</u>
	<u>k=3.70</u>	<u>$\theta_{95} = 72.10^\circ$</u>
	<u>N=4</u>	

FIG. 27-C



DESMAGNETIZACION TERMICA

0



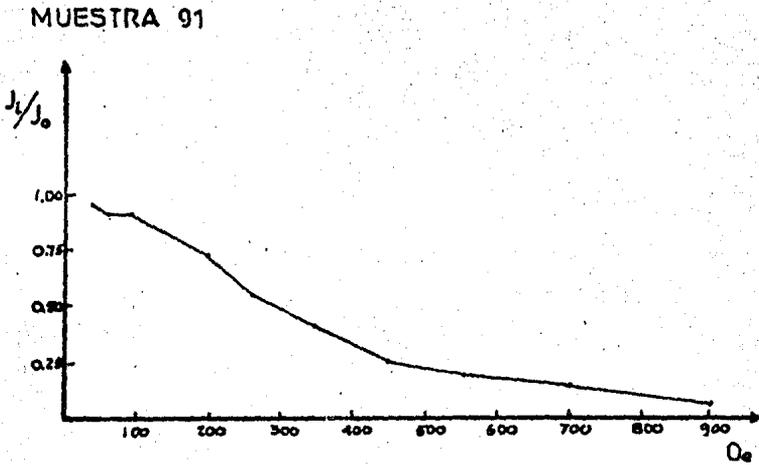
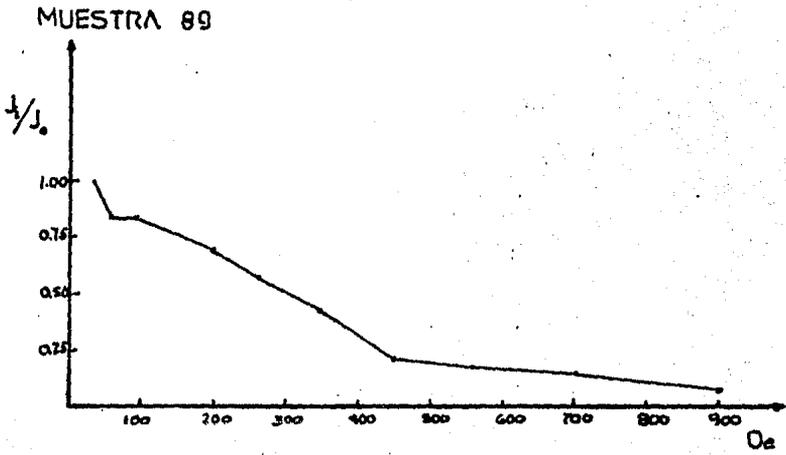
SITIO 10

RINCON DE LA VIA GRO.

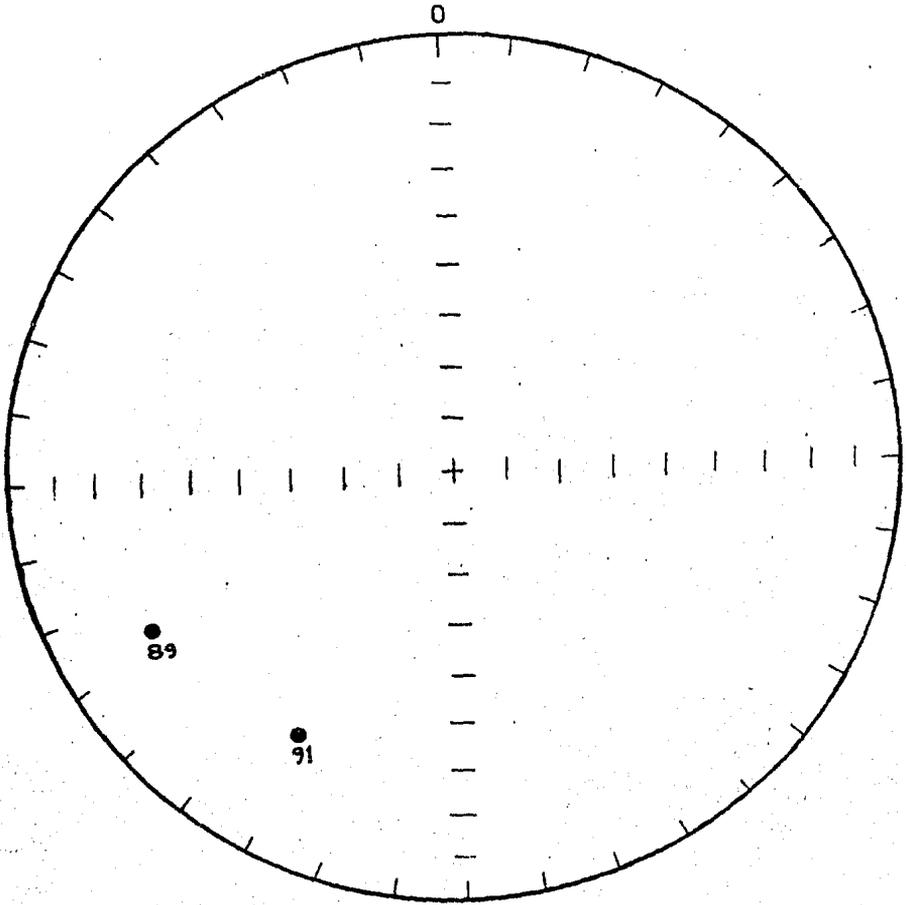
FIG. 28

	<u>R=300</u>	<u>$\alpha_{95} = 9.50^\circ$</u>
<u>TABLA</u>	<u>D = -147.33^\circ</u>	<u>$\theta_{50} = 6.00^\circ$</u>
<u>X</u>	<u>$\Sigma = 2100^\circ$</u>	<u>$\theta_{63} = 8.30^\circ$</u>
	<u>k = 94.60</u>	<u>$\theta_{95} = 14.40^\circ$</u>
	<u>N = 5</u>	

FIG. 28-A



D.C.M.A.D.



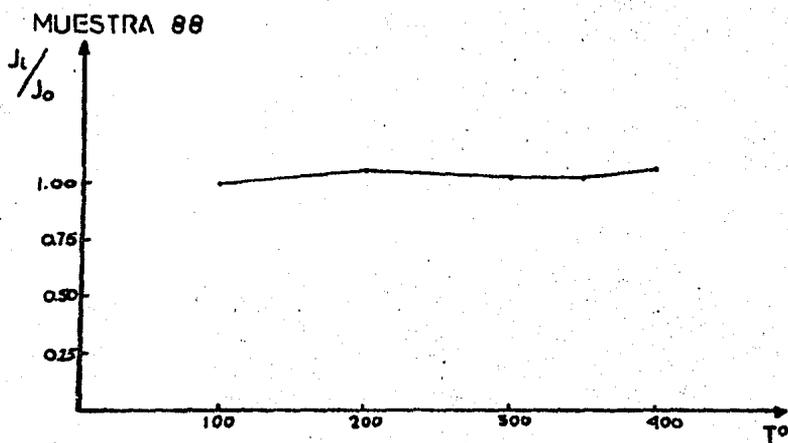
SITIO 10

(D.C.M.A.D.)

RINCON DE LA VIA GRO.

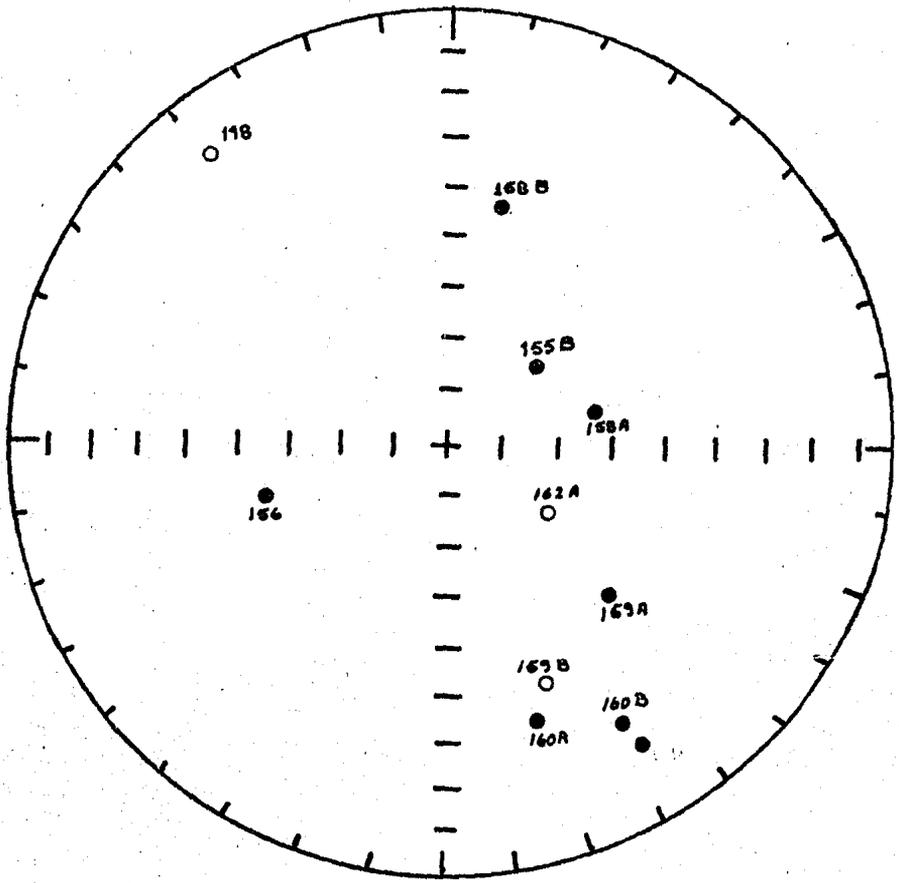
FIG.28-B

FIG. 28-C



DESMAGNETIZACION TERMICA

FIG. 29

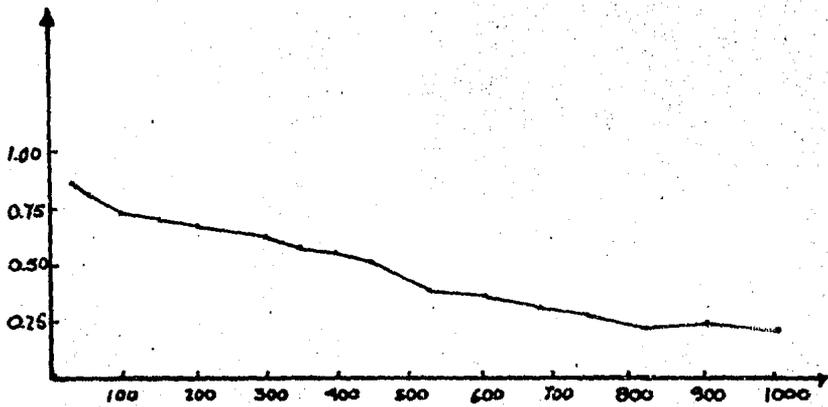


SITIO 1 y 2

AGUA DE OBISPO

FIG 29-R

MUESTRA 149 B



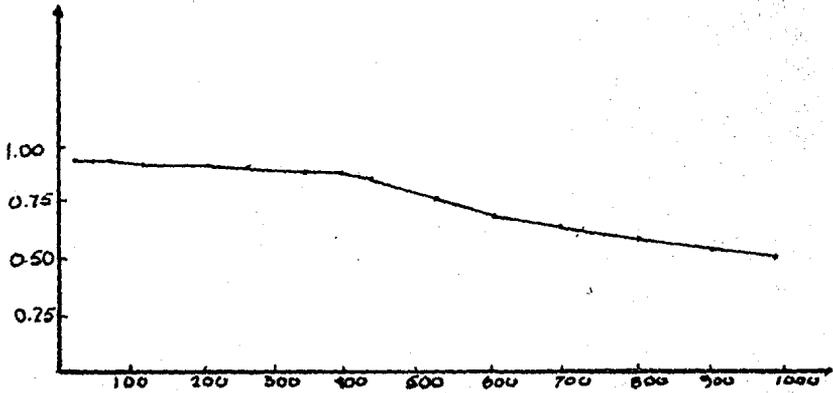
D.C.M.A.D

SITIO 1

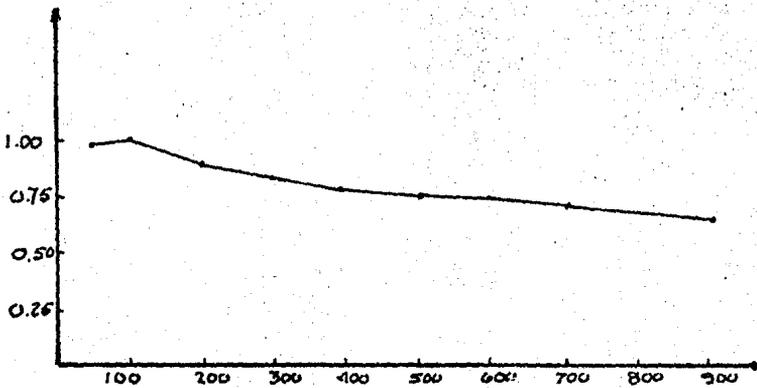
AGUA DE OBISPO

FIG 29-B

MUESTRA 150B

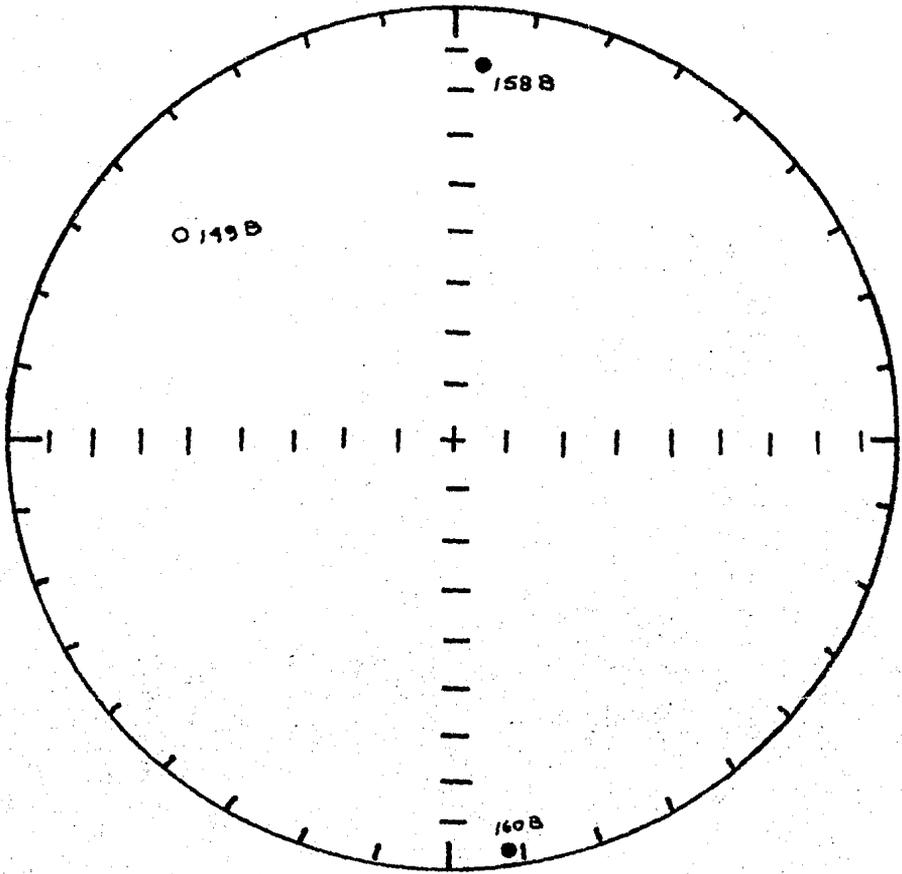


MUESTRA 160B



D. C. M. A. D
SITIO 2
AGUA DE OBISPO

FIG. 29-C



SITIO 1y2

D.C.M.A.D

AGUA DE OBISPO

VII.- CONCLUSIONES

- La zona presenta anomalías magnéticas intensas, predominantemente de carácter dipolar.
- La anomalía principal presenta carácter dipolar invertido. El máximo y el mínimo de la amplitud de la anomalía fueron estimados por el método de mínimos cuadrados y el ajuste fue de 400 gamas para el máximo, siendo el valor observado de 42500 gamas y el valor estimado de 42900 gamas. Para el mínimo el ajuste fue de 200 gamas, donde el valor observado fue de 41000 gamas y el estimado de 40800.
- Los datos aeromagnéticos se procesaron realizando primeramente una digitización cada 200 m sobre la anomalía principal (Fig. 9) obteniendo una retícula de 8 x 9.6 Km. Luego se procedió a calcular la continuación analítica, de la cual se obtuvieron dos casos: una continuación ascendente a 400 m y otra continuación ascendente a 500 m. En ambos casos se suavizó la anomalía pero se conservó su forma. Se calcularon también la reducción al polo, la primera y la segunda derivada.
- Se modeló un perfil (que pasa por el máximo y el mínimo de la anomalía) por el método de Talwani. El mejor ajuste se obtuvo con un modelo prismático que tiene los siguientes parámetros:

Profundidad : 2 Km

Ancho : 3 Km

Magnetización Efectiva : 13×10^{-3} A/m

En la zona de Rincón de la Vía se muestreo la Formación Alquitrán en 10 sitios, de los que se colectaron 91 núcleos con una perforadora portátil, las cuales fueron orientadas en el lugar. Del estudio de los especímenes se concluyó lo siguiente:

- Algunos sitios de la Formación Alquitrán presentan MRN de polaridad reversa, estos sitios son: 1-A, 3, 4, 6 y 7.
- Algunos sitios de la Formación Alquitrán presentan MRN de polaridad intermedia, estos sitios son: 1-B, 2, 5, 9-A y 9-B.
- Algunos sitios de la Formación Alquitrán presentan MRN de polaridad normal, estos sitios son: 8 y 10
- Estas MRN reversas podrían explicar la anomalía aeromagnética invertida observada en la zona.
- La Formación Agua de Obispo fue muestreada en dos sitios; las muestras obtenidas están intemperizadas y presentan intensidades bajas de MRN. Podría ocurrir que la intensidad fuese mayor en la roca no intemperizada.
- Las MRN que se presentan en la Formación Agua de Obispo son normales, intermedias y reversas.

- En la Formación Alquitrán, la temperatura de bloqueo en las muestras desmagnetizadas es mayor a los 400° C.
- De acuerdo a los resultados de desmagnetización térmica, que indican que la dirección de la magnetización remanente no varía con la temperatura, se concluye que la temperatura mínima de emplazamiento de las unidades piroclásticas es mayor de los 400°C. Esto concuerda con las observaciones de campo y las petrográficas que muestran que las rocas están piroconsolidadas y constituyen ignimbritas.
- De acuerdo a los análisis de desmagnetización, los minerales magnéticos portadores de la MRN presentan coercitividades menores de 1000 Oe que son compatibles con la serie de minerales de las titanomagnetitas.
- La serie de las titanomagnetitas son las que presentan valores mayores de intensidad de MRN.
- Debido al carácter dipolar invertido de la anomalía, no es posible usar en el modelado solo la magnetización inducida (la cual tiene la polaridad del campo magnético actual), por lo que se requiere considerar una magnetización remanente con polaridad reversa.
- El Paleomagnetismo constituye una técnica útil para el análisis e interpretación de datos magnetométricos.

BIBLIOGRAFIA

- Bhattacharya, B.K., 1964. Magnetic Anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophysics*, V 29, pp 517-553.
- Bremer B., M., 1984. Magnetoestratigrafía y Paleomagnetismo en Rocas Volcánicas del Centro de México. Tesis Ing. Geofísico, Fac. Ingeniería, UNAM.
- CONACYT, 1975. El Redescubrimiento de la Tierra.
- Contreras Tébar, D., Ramirez Cruz, L., Lopez Loera, H. y Urrutia Fucugauchi, J., 1984. Investigaciones de magnetismo de rocas y paleomagnetismo en la región de Tierra-Colorada-Chilpancingo, Guerrero. *GEOS Bol.*, v. 2, p. A-27.
- Collinson D.W., 1983. *Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism*. Ed. Chapman and Hall.
- Collinson D.W., Creer, K.M. y Runcorn, S.K. 1967. *Methods in Palaeomagnetism*. Ed. Elsevier.
- Cox A. 1973. *Plate Tectonics and Geomagnetic Reversals*. Ed. W. H. Freeman and Co.
- Gupta K. U., 1971. Evaluation of terrain effects in magnetic surveys. *Geophysics*, V. 36 pp 582.
- Howell, F.B. 1978. *Introduction to Geophysics*. Ed. Krieger Publishing Co.
- HYLSA. Proyecto Las Papas. Gerencia de Exploración.
- Klesse Elmar, 1970. *Geology of the El Ocotito-Ixcuinatoyac Region and of la Dicha Estratiform Sulphide Deposit*, State of Guerrero. *Bol. Soc. Geol. Mex.* V. 31, pp 107-140.
- McElhinny W. M., 1973. *Palaeomagnetism and Plate Tectonics*. Ed. Cambridge University Press.
- Meskó Attila, 1984. *Digital Filtering in Geophysical Exploration for Oil*. Ed. Pitman.
- Nettleton, L.L., 1976. *Gravity and Magnetics in Oil Prospecting*. Ed. Mc Graw Hill.
- Open University. *El Campo Magnético de la Tierra*. Ed. Mc Graw Hill.

- Talwani, M., 1965. Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape. *Geophysics* V. 30, pp 797-817.
- Talwani, M., Worzel, J. L. y Landisman, M., 1958. Rapid gravity computation for two dimensional bodies with application to the Mendocino Submarine Fracture Zone. *Journal of Geophysical Research*, V 64 pp 49-59.
- Tarling, D. H., 1971. *Principles and Applications of Palaeomagnetism*. Ed. Chapman and Hall.
- Telford, W. M., 1976. *Applied Geophysics*. Ed. Cambridge University Press.
- Urrutia F. J., 1976. Algunos métodos estadísticos usados en paleomagnetismo. *Anales del Instituto de Geofísica*, V. 22-23, pp 87-98.
- Urrutia F. J., 1976. Estudio Paleomagnético de Rocas Igneas del Noroeste del Edo. de Jalisco, México. Tesis de Maestría en Ciencias (Geofísica) UNAM, 292 p.
- Urrutia F. J., 1977. Importancia del magnetismo remanente natural en la interpretación de anomalías magnéticas. *Boletín Asociación Mexicana Geofísicos Exploración*, v. 18, pp 83-116.
- Urrutia F. J., 1978. Análisis de la Estabilidad del MRN. *Anales del Instituto de Geofísica*, V 24, pp 117-146.
- Urrutia F., J., 1979. Apparent polar wander path for Mexico. *Geophysical Journal*, V. 56, pp 227-235.
- Urrutia F. J., 1979. Significado y utilización de Magnetizaciones de Múltiples Fases. *Anales del Instituto de Geofísica*, V. 25, pp 101-123.
- Urrutia F. J., (Ed) 1981. *Palaeomagnetism and Tectonics of Middle America and Adjacent Regions-Part 1*. *Geofísica Internacional*, V. 20, pp 1-270.
- Urrutia F. J., (Ed) 1983. *Paleomagnetism and Tectonics of Middle America and Adjacent Regions-Part 2*. *Geofísica Internacional*, V. 22, pp 1-
- Urrutia F. J., 1984. On the tectonic evolution of Mexico: Paleomagnetic constraints. *Geodynamic Series*, V. 12, pp 27-39.

- Valencio, D., 1980. El Magnetismo de las Rocas. Ed. Universidad de Buenos Aires.
- Zenteno, Z.E., 1984. Interpretación de Anomalías Aeromagnéticas en la Región del sur de Michoacán. Tesis Ing. Geofísico, Fac. Ingeniería, UNAM.