

3
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

PALEOMAGNETISMO, PROPIEDADES FISICAS
E INTERPRETACION AEROMAGNETOMETRICA
DE LA REGION LAS HABILLAS, GUERRERO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO GEOFISICO

P R E S E N T A

José Enrique Escobar Hernández

DIRECTOR DE TESIS

JAIME URRUTIA FUCUGAUCHI

MEXICO, D.F.

1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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

Agradecimientos.	xi
Resumen.	xi
Capítulo I.- Introducción.	1
I.1. Planteamiento del Problema.	1
I.2. Objetivos del estudio.	2
I.3. Desarrollo del trabajo.	3
Capítulo II.- Geología y muestreo.	4
II.1. Geología regional y Fisiografía.	4
II.2. Estratigrafía.	6
II.3. Área de estudio.	7
II.3.1. Selección de la zona.	7
II.3.2. Localización y vías de comunicación.	7
II.3.3. Clima y vegetación.	8
II.3.4. Población.	8
II.4. Muestreo.	8
Capítulo III.- Estudio de Propiedades Magnéticas y Paleomagnetismo.	10
III.1. Antecedentes.	10
III.2. Propiedades Magnéticas.	10
III.2.1. Susceptibilidad Magnética.	10
III.2.2. Diamagnetismo.	11
III.2.3. Paramagnetismo.	11
III.2.4. Ferromagnetismo.	12
III.3. Magnetismo de Rocas.	12
III.4. Paleomagnetismo.	13
III.4.1. Magnetismo Remanente Natural.	14
III.4.2. Otros tipos de Magnetizaciones Remanentes.	14
III.4.3. Minerales Magnéticos.	15

III.4.4. Estabilidad de la MRN.	16
III.4.4.1. Prueba de Campo.	16
III.4.4.2. Pruebas de laboratorio.	16
III.4.5. Presentación de datos.	18
Capítulo IV.- Estudio Aeromagnetométrico.	20
IV.1. Aeromagnetometría.	20
IV.2. Aeromagnetometría y ambientes minerales.	21
IV.3. Interpretación Magnética	22
IV.3.1. Reducción al polo.	23
IV.3.2. Segunda Derivada.	23
IV.3.3. Continuaciones Ascendentes y Descendentes.	23
IV.4. La MRN y la interpretación de datos magnéticos.	25
IV.5. Descripción cualitativa del mapa aeromagnetométrico.	26
IV.6. Análisis e interpretación de las anomalías de interés.	26
IV.6.1. Anomalia IV	26
IV.6.2. Anomalia I.	28
IV.6.3. Anomalia II.	29
IV.6.4. Anomalia III.	30
Capítulo V.- Resultados y Discusión.	32
V.1. Presentación de los sitios.	32
V.1.1. Sitio I.	33
V.1.2. Sitio II.	33
V.1.3. Sitio III.	34
V.1.4. Sitio IV.	35
V.1.5. Sitio V-VI.	36
V.1.6. Sitio 12-9-3.	37
V.2. Propiedades Físicas para núcleos.	37
V.3. Fragmentos.- estudio paleomagnético y propiedades físicas	38
CONCLUSIONES.	41
Figuras y Tablas.	44
Bibliografía.	96

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer las orientaciones, su paciencia y el constante estímulo recibido por el Dr. Jaime Urutia Fucugauchi para el desarrollo del presente trabajo.

Agradezco también la revisión crítica del manuscrito, los comentarios y las correcciones atinadas de los doctores Elsa Leticia Flores Márquez, René Chávez Segura y Dante Jaime Morán Zanlano y del M.C. Juan M. Brandl Punza. Así como a todas aquellas personas que de alguna u otra manera colaboraron en el desarrollo de la misma.

Resumen.

Se reportan y analizan los resultados obtenidos por aplicar los métodos Paleomagnético, magnetométrico y de propiedades físicas en la región de "Las Habillas", Estado de Guerrero. En esta zona se seleccionaron cuatro anomalías magnéticas intensas de carácter dipolar; con amplitudes de 1400 a 5500 nandeeslas, entre máximo y mínimo; que fueron interpretadas cuantitativamente y podrían estar asociadas a cuerpos de interés económico con forma de dique (mineralizaciones de hierro).

Los estudios de paleomagnetismo y de propiedades físicas, se realizaron con la finalidad de tener un control sobre los parámetros que intervienen en la interpretación magnetométrica cuantitativa (magnitud y dirección de la magnetización remanente natural (MRN), susceptibilidad y la componente magnetométrica total), detectar los minerales portadores del magnetismo remanente, así como para documentar las propiedades magnéticas de las distintas unidades. Para dichos estudios, se colectaron 40 muestras de núcleo, de siete sitios y 36 muestras de fragmentos, de nueve sitios.

En el laboratorio de Paleomagnetismo, del Instituto de Geofísica, se les midió la MRN, con un magnetómetro de giro. La estabilidad y composición vectorial de las magnetizaciones, se analizaron con desmagnetización por campos magnéticos alternos decrecientes (DCMAD) y por altas temperaturas. Los especímenes estudiados mostraron coercitvidades mayores de 100 mT (nueve sitios) y menores de 100 mT (seis sitios), que son características de las limeno-hematitas y titanomagnetitas, respectivamente. Sin embargo el estudio isotermal, nos infiere la presencia de dos minerales portadores de la remanencia, en la mayoría de las muestras; posiblemente se trate de magnetita asociada con diferentes cantidades de hematita. Esto indica que las rocas estudiadas sufrieron procesos de oxidación de temperatura baja.

I.- INTRODUCCION.

Desde antes de los albores de la Historia escrita, los seres humanos han buscado en la superficie y las entrañas de nuestro planeta, los materiales para construir su morada, sus herramientas de trabajo y utensilios diarios. Durante miles de años este hurgar y arañar la tierra en pos de arcillas, pedernales, piedras relictas, o de trazos sueltos de cobre nativo, evolucionó hacia la investigación del subsuelo en franca búsqueda de materias primas minerales.

Conforme las sociedades se han desarrollado, ha crecido constantemente la necesidad de minerales. Actualmente, son de uso común los productos minerales que se extraen de la tierra y que repercuten en todos los aspectos de nuestras vidas, provocando una necesidad de éstos tan ingente que su búsqueda no ha cesado y si ha ido en aumento notable y de manera incansable.

Esta gran necesidad por las materias primas y la capacidad de la tierra para satisfacerla, constituye el punto de partida para cualquier estudio sobre minerales.

En todo esto, el medio físico constituye el punto inicial. Los minerales componen la corteza terrestre y cada elemento en particular representa un porcentaje diferente en las rocas que componen la Tierra. Aunque es posible que sea pequeña la cantidad de cualquier elemento contenido en una determinada roca, la existencia total de él supera nuestra imaginación.

I.1.- Planteamiento del problema.

Las materias primas minerales con mayor importancia, son los minerales metálicos en especial los metales preciosos y los metales estratégicos para la industria de la transformación. Dentro de los minerales metálicos estratégicos más comunes se tiene al hierro. Este mineral es de suma importancia en la industria de la transformación de cualquier país del mundo; en nuestro país, tiene su ubicación principal en la margen pacífica, debido a que estos yacimientos se originaron por la convergencia de una placa oceánica bajo una continental. Esta convergencia abarca los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Este ambiente controla la historia de formación tanto de las rocas como de las estructuras presentes en dicha región, así como su secuencia temporal de desarrollo.

En general, el ambiente de arcos magmáticos son regiones bien definidas de actividad ígnea volcánica y plutónica. Estos son elementos metalogenéticos importantes, caracterizados por la formación de yacimientos que muestran una fuerte asociación espacio-tiempo con el magnetismo calicoalcálico (Campa y Coney, 1983).

El presente trabajo surge dentro de un proyecto minero para exploración de hierro, realizado por la empresa minera "Las Encinas, S. A." en la parte centro-sur del estado de Guerrero.

Uno de los métodos geofísicos más usados en la prospección del mineral de hierro es el método magnetométrico, tanto aéreo como terrestre; amén de que también está, entre los métodos geofísicos más económicos y desde el punto de vista operacional, entre los más sencillos y rápidos.

El proyecto de la empresa arriba mencionada, en su etapa de trabajo de semidetalle, consistió en la verificación de tres anomalías aeromagnéticas por magnetometría terrestre.

1.2.- Objetivos del estudio.

Como el mineral buscado tiene un comportamiento ferromagnético y por lo tanto es capaz de presentar magnetización en ausencia de un campo magnético (a ésta propiedad se le denomina con el nombre de Magnetización Remanente Natural, MRN), cualquier interpretación magnetométrica cuantitativa que se pretenda realizar en este tipo de exploración, requiere la cuantificación de la magnetización remanente para que ésta sea fiable. De aquí surge la necesidad de realizar un estudio de la MRN o magnetismo fósil (Paleomagnetismo) que aunado con un estudio de propiedades petrofísicas, permitan la interpretación cuantitativa de las anomalías aeromagnéticas verificadas.

Esta interpretación - como se demostrará adelante - es importante realizarla con el mayor control posible de las variables que intervienen en ella. Es aquí, donde el paleomagnetismo y las propiedades petrofísicas son unas de las principales herramientas de apoyo para lograrlo, puesto que de ellas obtenemos la magnitud, dirección de la MRN, así como la susceptibilidad magnética y la componente magnetométrica total.

La aplicación de estas tres metodologías, permitieron lograr los siguientes objetivos:

- Estudiar las características y estructura de la zona, en particular los cuerpos responsables de las anomalías magnéticas.
- Documentar las propiedades magnéticas de las distintas unidades y mineralización de las zonas muestreadas.
- Investigar las relaciones entre las propiedades petrofísicas y la respuesta magnetométrica.
- Estudiar las variaciones del Campo Magnético Terrestre (CGM) en las unidades estudiadas y documentar las direcciones de la MRN.
- Determinar los principales portadores magnéticos de la MRN.
- Demostrar la importancia de la MRN en la interpretación cuantitativa de anomalías aeromagnéticas, en especial para zonas donde afloran Rocas Ígneas Extrusivas (RIE).

1.3.- Desarrollo del trabajo

Es importante señalar que la zona de trabajo, carece de algún estudio geológico o geofísico local, que sirviera como antecedente, no así, en lo que respecta a estudios regionales del área o locales de zonas cercanas a los sitios estudiados.

Las áreas de trabajo fueron elegidas bajo el criterio de que en el mapa de control aeromagnetométrico se presentaban una serie de máximos y mínimos, los cuales, como anteriormente se dijo, se verificarían por magnetometría terrestre.

Del conjunto de anomalías dipolares que se presentaban en el plano, sólo se pudieron muestrear paleomagnéticamente rocas que corresponden a dos de las tres anomalías aeromagnéticas que se verificaron en este proyecto. Cabe hacer la aclaración que si bien, solamente se muestrearon dos anomalías y por lo tanto sólo se tienen dos áreas de estudio, en el presente trabajo no hablaremos de "zona de anomalía" sino de "zona anómala" debido a que en el trabajo de interpretación aeromagnetométrica, se procesaron cuatro anomalías y no dos, dada la gran cercanía entre ellas. Por esta razón el término "zona anómala" implica la existencia de dos anomalías y no tan sólo un cambio de nombre.

Los estudios de paleomagnetismo y de propiedades petrofísicas se realizaron con 41 especímenes de siete rocas, pertenecientes a las zonas anómalas 12-9-7 y 12-9-3 (31 y 10 especímenes respectivamente) y de fragmentos de muestras de bloque y de mano (36 fragmentos) de nueve sitios pertenecientes a la zona anómala 12-9-7.

La tesis que a continuación se presenta consta de cinco capítulos que brevemente resumiremos:

-Como subcapítulos del uno, se ha incluido el planteamiento del problema y los objetivos del estudio, así como una breve reseña de la geología regional del área de estudio.

-En el capítulo dos se hace una descripción de la geología regional y "local" del área de estudio, así como la ubicación precisa de las zonas y la metodología seguida para el muestreo paleomagnético.

-En el capítulo tres, se hace una exposición breve de los antecedentes teóricos necesarios de las propiedades magnéticas, que permiten entender con claridad el paleomagnetismo y su metodología.

-En el capítulo cuatro se hace una descripción cualitativa del mapa aeromagnetométrico general, del cual se analizan e interpretan cuantitativamente cuatro anomalías, tomando en cuenta los parámetros aportados por el estudio paleomagnético y de propiedades petrofísicas reportados en el capítulo cinco, así como la información obtenida por la aplicación de los operadores matemáticos de reducción al polo, segunda derivada

y continuaciones analíticas ascendentes y descendentes. Se resalta y se demuestra la importancia de la MRN en el modelado magnetométrico y la correspondencia entre las anomalías calculadas y observadas; mostrando además los efectos de cada una de las componentes (inducido, remanente y total). Los modelos geofísicos se realizaron mediante el método de Taiwani bidimensional.

-En el capítulo cinco se presenta la metodología, los resultados y la discusión de los métodos paleomagnético y de propiedades petrofísicas para muestras superficiales tanto de especímenes como de fragmentos. Y un apartado como conclusiones.

Además para el lector interesado, al final del trabajo presento una bibliografía completa sobre los temas expuestos.

Por cuestiones prácticas, todas las ilustraciones y gráficos se presentan recopiladas hasta el final de éste trabajo.

II.- GEOLOGIA Y MUESTREO.

II.1- Geología Regional y Fisiografía.

El lugar de estudio se encuentra en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur, ubicada al sur del eje Neovolcánico, que abarca desde Colima hasta Oaxaca, incluyendo zonas contiguas del Noroccidente de Guerrero, Michoacán y estado de México. (véase la fig. 2.1).

Esta provincia presenta rasgos regionales de una alta complejidad estructural. Esta formada por dominios tectónicos de diferente naturaleza y edad. De acuerdo a la división tectonoestratigráfica de Campa y Cony (1983), se reconocen en esta provincia fisiográfica cuatro terrenos diferentes, delimitados por fallas; que son el Terreno Guerrero, Terreno Mítaca, Terreno Oaxaca y Terreno Xolapa.

El Terreno Guerrero se caracteriza por la presencia de secuencias volcanosedimentarias del Jurásico tardío-Cretácico temprano intrusionadas por cuerpos plutónicos principalmente Cretácicos (Campa y Ramirez, 1983).

El Terreno Mítaca presenta un basamento polimetamórfico que incluye cuerpos de migmatitas, metasedimentos y roca verde, así como cuerpos ofiolíticos metamorfozados, granitoides milonitizados y un intrusivo trondhjemítico (Ortega-Gutiérrez, 1978; 1981); con edades que corresponden principalmente al Paleozoico inferior.

El Terreno Oaxaca cuenta con un basamento metamórfico formado por meta-arenostitas, paragneises y granulitas con intervalos de ortogneises charnoquitas y sienitas, este basamento tiene edades reportadas de 900 a 1200 millones de años (Ma).

El Terreno Xolapa, tal como fue definido por Campa y Coney (1963), constituye un cinturón metamórfico-plutónico de forma elongada, empazado a lo largo de la costa pacífica de los estados de Guerrero y Oaxaca; reporta además la presencia de enjambres de diques máficos y venas de pigmáticas que exhiben un carácter sinplutónico con relación a los granitos y gneisos que los encajonan.

Campa y Ramírez (1979), y Vidal y colaboradores (1980), consideran que las secuencias volcánico-sedimentarias mesozoicas de una gran parte de la sierra Madre del Sur son el resultado de una actividad magmática de un límite convergente de placas desarrollado durante el Cretácico temprano.

II.2.- Estratigrafía.

El área de estudio no cuenta con trabajos de geología a detalle, que nos pudieran formalizar y ante todo puntualizar sobre los afloramientos que fueron muestreados; sin embargo la existencia de levantamientos geológicos a detalle en las zonas circundantes, nos proporcionan un sustrato geológico fundamental para extrapolar la estratigrafía de nuestro sitio de estudio, el cual se ve un tanto corroborado por estudio petrográfico de algunas muestras del área que se realizó en el departamento de geología de la empresa minera "Las Encinas", S.A., las cuales parecen corresponder a las dos unidades estratigráficas terciarias, propuestas en el estudio de Kleese (1968).

El estudio petrográfico de la empresa, las observaciones preliminares de campo y ante todo la estratigrafía de una área cercana, la región del Ocotillo-bucuinatoyac, estudiada a detalle por Kleese (1968), fueron los criterios para retomar su columna estratigráfica.

En la zona de estudio se tienen mapeadas seis unidades estratigráficas, cuyos nombres y correlación los podemos ver en la fig. 2.2. Sin embargo en el área sólo afloran rocas volcánicas terciarias.

Paleozoico o Precámbrico.- Complejo Xolapa.- Unidad estratigráfica base (de Ceerna, 1965). Se constituye esencialmente de un esquistos de biotita metamorfoseado a facies de esquistos verdes, con un espesor de aproximadamente 1000 m. Sin embargo, investigadores más recientes indican que el Terreno Xolapa (1.3 - 1.8 Ga) evolucionó en el Cretácico como un arco magmático emplazado en una margen continental constituida probablemente por los complejos Ocosingo y Acatán (Morán-Zenteno, 1992).

Paleozoico.- Formación bucuinatoyac.- Definida por primera vez por Kleese (1968). La constituyen rocas plegadas fuertemente y metamorfoseadas moderadamente. Esta constituida especialmente de cuarcitas y filitas impuras, abundando más éstas últimas. Dicha formación cubre de manera discordante a el complejo Xolapa. Presenta un espesor de 400 m en sección tipo.

Triásico-Jurásico.- Formación Chapolepa.- Esta unidad fue definida por De Cserna (1965). Esta formación comprende una variedad de rocas, principalmente volcánicas y sedimentarias. Presenta un espesor superior a los 1000 m. Dicha formación sobreyace discordantemente a las dos anteriores.

Cretácico.- Formación Morelos.- Esta formación fue definida originalmente por Fries (1960). Constituida por calizas y dolomías. Su espesor varía de 500 a 1000 m, en el sureste y norte-noreste, respectivamente.

Terciario.- Las rocas que constituyen la secuencia terciaria en esta región incluyen unidades sedimentarias continentales y rocas volcánicas.

Como parte de la secuencia volcánica se pueden reconocer dos unidades que de Cserna (1965) denominó Formaciones Agua del Obispo y Alquitrán que pudieran correlacionarse con las unidades muestradas (ver Tabla 2.1 y 2.2)

Dichas formaciones se definen así:

Formación Agua del Obispo.- Tiene un espesor aproximado de 800m y consiste en partes de flujo de lava de composición cuarzo-latítica en su miembro inferior y composición latítica en su parte superior. Las cuarzo-latitas son de color rojo y la latita es de color gris obscuro y en algunos lugares negra. Bajo el microscopio la latita muestra una textura plagioclítica, los feldespatos son en parte potásicos y en parte plagioclases; existe además la presencia de algunos hilillos de diópsida y también abundante hipersteno. Otros minerales secundarios son calcita y cuarzo, en forma de vesículas. A esta formación se le asigna una edad del oligoceno tardío y mioceno temprano por criterios estratigráficos.

Formación Alquitrán.- Con un espesor parecido al anterior, cubre discordantemente a ésta. Se compone 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 junto con fragmentos líticos. Su composición es riódacítica. Esta roca es mucho más resistente que la subsiguiente.

En investigaciones recientes, éstas rocas volcánicas se han hecho pertenecer al arco magmático continental, desarrollado en el Paleógeno, con un duración de aproximadamente 43 Ma., de afinidad calcialcalina, relacionada a la subducción de márgenes convergentes cuyo magmatismo dió origen a la Sierra Madre del Sur y cuya tendencia evolutiva es paralela y contemporánea con las ignimbritas Oligocénicas de la Sierra Madre Occidental (Niño-Obregón et al, 1981).

Unidad estratigráfica perteneciente al Cuaternario.- Existen muy pocos depósitos aluviales, debido a que el área se encuentra en la fase de erosión muy activa. El aluvión del valle de Ocotillo podemos mencionarlo, probablemente acumulado por razones estructurales. Los depósitos en el valle de Soyatepec se deben probablemente a la existencia de una falla. Condiciones similares pudieron haber ocasionado la acumulación de depósitos aluviales al noroeste del Rincón de Alcaparrosa el cual cubre una área pequeña.

II.3.- Área de Estudio.

II.3.1.- Selección de la Zona.

En base a que el estudio se centra en una aplicación del Paleomagnetismo y propiedades magnéticas para la interpretación de anomalías aeromagnetométricas, el área de estudio se seleccionó por las anomalías aeromagnéticas altas y dipolares que se presentan en el mapa aeromagnético, levantado en vuelo de contorno a 250 m. por la empresa minera "Las Enchilas", S.A. Este mapa corresponde a la carta topográfica E-14C45 "Las Habillas", escala 1:50000 de INEGI.

Bajo este criterio, se eligieron dos zonas anómalas que se denominan: 12-9-3 y 12-9-7 en las cuales se ubican dos anomalías de interés en cada una, a las cuales se han denominado anomalías IV (azul) y I (morado) para la zona anómala 12-9-7 y las anomalías II (amarillo) y III (negro) para la zona anómala 12-9-3.

De manera concreta, todo el muestreo paleomagnético se llevó a cabo en rocas ígneas extrusivas que cubren en su mayor parte al área seleccionada. Esta característica permite que el método paleomagnético y el estudio de propiedades magnéticas se tornen imprescindibles para la interpretación magnetométrica cuantitativa, debido a que estas rocas presentan valores altos de MRN.

El área de estudio se puede apreciar en la fig. 2.3 y con más detalle y con topografía en la fig. 2.4. El área de estudio abarca una superficie de 63 Km².

II.3.2.- Localización y vías de comunicación.

El área de estudio se localiza aproximadamente a 50 km hacia el norte de la ciudad costera Tecpán de Galeana. La principal vía de acceso es la carretera federal Acapulco-Zihuatanejo.

El acceso a la zona de interés es complicado, puesto que sólo se cuenta con caminos de terracería, los cuales están en mal estado y se tornan intransitables en épocas de lluvias.

Las zonas de estudio se localizan en lo que se conoce como el "flanco mayor" de la Montaña, cuyas alturas oscilan entre los 1600 y 3000 m. s.n.m. Sus coordenadas geográficas son para las dos zonas: de 17° 30' a 17° 34' latitud norte y de 100° 23' a 100° 29' longitud oeste. Esta área de estudio se encuentra dentro del municipio de Atoyac de Álvarez.

II.3.3.- Clima y vegetación.

El clima de la región se encuentra regido por la altura. Es cálido para las zonas que se sitúan a altitudes menores de 1000 m. y se extienden a las costas y a la cuenca del Balsas. El clima templado queda restringido a las franjas altimétricas entre los 1000 y 3000 m. s.n.m. (área de estudio). A estas alturas la vegetación dominante es el Pino y el Encino. En esta área, las isotermas tienden a ser paralelas a la costa y a la Sierra Madre del Sur.

II.3.4.- Población.

El municipio de Atoyac de Alvarez tiene una densidad de población de 20 habitantes por km². El índice de analfabetismo es del 50 %, el idioma indígena dominante es el Nahuatlano.

II.4.- Muestreo.

El muestreo paleomagnético se realiza en general de acuerdo a dos modalidades: el de bloques y el de perforación. La selección del método se hace en base al objetivo de 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 orientación de las muestras se utilizó un dispositivo construido en el laboratorio de Paleomagnetismo que funciona con orientador solar o brújula magnética. (ver fig. 2.5).

Es recomendable que el muestreo se realice en afloramientos frescos y los cuales no presenten desplazamientos o rotaciones visibles.

El muestreo paleomagnético realizado durante el desarrollo del presente estudio, se tornó complicado debido a los factores arriba mencionados, aunados con la falta de agua para poder perforar. Sin embargo se pudieron establecer siete sitios de muestreo, con un total de 40 núcleos con diferente número de éstos en cada sitio (de 1 a 10). Los sitios correspondieron a diferentes unidades litológicas. En la zona 12-9-7 se colectaron muestras de seis sitios y para la zona 12-9-3 sólo de un sitio.

El muestreo paleomagnético se realizó mediante muestras de bloque y núcleos de perforación. Este último fue realizado con una perforadora portátil con motor de combustión interna, la cual utiliza barrenas no magnéticas con coronas impregnadas de diamante. Las muestras obtenidas fueron orientadas "in situ" con brújula magnética y con orientador solar donde la magnetización de la roca era muy alta (sitios I, V, VI y 12.9.3.#).

En el laboratorio se cortaron y se obtuvo un espécimen por cada núcleo, excepto para un núcleo que proporciono dos especímenes- dando como resultado 41 especímenes (ver tabla 2.3)

TABLA 2.3

SITIO	NUCLEOS	ESPECIMENES	OBSERVACIONES
I.#	8	8	La brújula magnética no funciona*.
II.#	8	8	La brújula " " sí funciona.
III.#	8	8	" " " "
IV.#	3	3	" " " "
V.#	2	2	" " no funciona*.
VI.#	1	1	" " " "
12.9.3.#	10	10	" " " "
TOTAL	40	41	

* En los sitios donde no funcionó la brújula magnética, se utilizó el orientador solar.

Por problemas técnicos, las muestras de bloque no pudieron perforarse en el laboratorio por lo que se optó por fragmentar algunas muestras de bloque y de mano, para medirles su MRN (medido con un magnetómetro de giro marca Molspin), susceptibilidad (fue medida con un susceptillmetro Bartington, modelo MS2 y sensor MS2B, en unidades SI y frecuencia baja), densidad, así como aplicarles desmagnetización por campos alternos (9 pasos, con un instrumento Schonstedt AF) y magnetización isotermal (MRI, con 10 o 12 pasos) hasta campos máximos cercanos a una tesla. Respecto a los núcleos, se midieron las mismas propiedades y se aplicaron los mismos estudios de estabilidad aunados con la desmagnetización térmica (por problemas técnicos sólo dos y tres pasos, con un desmagnetizador eléctrico no-inductivo TSD-1 Schonstedt).

III.- ESTUDIO DE PROPIEDADES MAGNETICAS Y PALEOMAGNETISMO.

III.1.- Antecedentes.

El interés del hombre por el magnetismo de las rocas se remonta a los albores de la civilización. Pero es a mediados de nuestro siglo cuando su aplicación a las Ciencias de la Tierra se hace contundente, debido al advenimiento de Instrumentos electrónicos capaces de medir la Magnetización Remanente Natural (MRN) de las rocas. Esto permitió, por un lado, extender el conocimiento de las características del Campo Geomagnético (CGM) en el pasado histórico y geológico y, por el otro, explicar las respuestas magnéticas, aparentemente anómalas, asociadas a ciertas rocas. De esta manera la disciplina que conocemos como Paleomagnetismo madura.

Dicha disciplina contribuyó al desarrollo de la teoría de la Tectónica de Placas y permitió resolver un sinnúmero de problemas relacionados a las Ciencias de la Tierra así como plantear posibilidades nuevas en la investigación.

Aunque una investigación paleomagnética trae consigo el estudio de las propiedades magnéticas de las rocas estudiadas, un estudio de propiedades magnéticas no implica un estudio paleomagnético, puesto que éste no involucra el cálculo de paleodirrecciones.

Investigar los componentes magnéticos que constituyen a las rocas y algunos yacimientos es de gran importancia en investigaciones de índole minera, geológica y geofísica. Por ejemplo: el problema de la interpretación de datos de magnetometría (que pueden ser: marinos, terrestres y aéreos, como el que nos compete aquí), estudios de alteración de rocas ígneas (alteraciones de baja temperatura en basaltos oceánicos, alteraciones hidrotermales en áreas geotérmicas, etc), en exploración y explotación de hierro (particularmente aquellos yacimientos de baja concentración), por supuesto en investigaciones paleomagnéticas y muchas otras más.

III.2.- Propiedades Magnéticas.

Las propiedades magnéticas de rocas y minerales dependen de factores tales como: composición, forma y tamaño del grano, presión y temperatura, origen de los minerales magnéticos y características de los diferentes tipos de magnetismo remanente que las rocas y minerales pueden adquirir durante su origen e historia geológica.

III.2.1.- Susceptibilidad Magnética.

La susceptibilidad magnética está definida por la relación:

$$MI = k H \quad \dots (3.1)$$

o alternativamente

$$J_i = \chi H = B / \mu \quad \dots (3.2)$$

donde una magnetización por unidad de volumen M_i o por unidad de masa J_i es inducida en un material de susceptibilidad volumétrica k o susceptibilidad de masa χ por la aplicación de un campo H .

El estado magnético de un material puede o no ser irreversiblemente alterado por la aplicación de un campo H y la susceptibilidad puede ser independiente o variar con H . La mayor parte de los materiales son diamagnéticos y paramagnéticos, en los cuales el efecto del campo aplicado es reversible y para propósitos prácticos la susceptibilidad es independiente de la magnitud del campo; el ferromagnetismo está asociado con la irreversibilidad y dependencia de la susceptibilidad a la magnitud del campo aplicado.

La susceptibilidad de una roca depende de su contenido de minerales magnéticos. En la mayor parte de las rocas, los minerales magnéticos están relacionados con la abundancia de magnetita. La susceptibilidad (k) de las rocas es aproximadamente proporcional al porcentaje en volumen (V) del contenido de minerales magnéticos. Existe una gran cantidad de relaciones empíricas entre k y V . Además del contenido de magnetita existen otros factores que intervienen en la susceptibilidad magnética, tales como el tamaño del grano y composición.

De acuerdo con su comportamiento en presencia de campos magnéticos bajos (del orden de 0.1 mT), los materiales se han dividido para su estudio en diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos (ver fig. 3.1).

III.2.2.- Diamagnetismo.

En los materiales diamagnéticos cuyas capas electrónicas están completas, al someterlos a un campo externo, la precesión de las órbitas de sus electrones, genera un momento magnético en la dirección opuesta al campo magnético aplicado. En los materiales diamagnéticos la susceptibilidad es pequeña y menor que cero, del orden de 10^{-6} a 10^{-5} (S.I.). Ejemplos de estos materiales tenemos a el cuarzo, la sal y los feldespatos, considerados diamagnéticamente dominantes y como tales no pueden contribuir a las propiedades magnéticas en problemas geológicos.

III.2.3.- Paramagnetismo.

En materiales paramagnéticos sus capas electrónicas están incompletas, cada átomo posee un momento magnético debido a los espines electrónicos desbalanceados. En presencia de un campo magnético externo, la precesión electrónica producirá un campo magnético en la misma dirección del campo aplicado. Poseen susceptibilidades del mismo orden que los anteriores pero es positiva (10^{-5} a 10^{-3}). Son inversamente proporcionales a la temperatura absoluta. Ejemplos de estos materiales son los minerales como: fayalita, forsterita, piroxenos, biotitas, anfíboles, cordieritas, granates, etc.

III.2.A.- Ferromagnetismo.

En el caso de átomos de algunos elementos (elementos de la primera serie de transición), se tiene un efecto de interacción (intercambio directo entre átomos adyacentes o a través de aniones) que produce una magnetización espontánea aún en ausencia de un campo magnético externo. Los materiales formados por estos elementos y cuyos enlaces son metálicos, se les denomina ferromagnéticos, que presentan susceptibilidades positivas y pueden alcanzar valores muy altos (si los materiales diamagnéticos y paramagnéticos tienen susceptibilidades menores de 10^{-3} , los ferromagnéticos son 10^5 veces más grandes).

En la práctica es posible encontrar materiales que se comportan de manera muy diferente a los aquí mencionados, especialmente los materiales estudiados en investigaciones paleomagnéticas o arqueomagnéticas. Dichos materiales presentan un comportamiento intermedio entre los paramagnéticos y los ferromagnéticos, a dichos materiales se los ha clasificado en ferrimagnéticos, antiferromagnéticos y antiferromagnéticos imperfectos (ver fig. 3.2).

Debido a que en estos materiales la interacción es un factor importante, la modificación de las distancias interatómicas causadas por cambios de temperatura modifica sus propiedades magnéticas. La temperatura arriba de la cual se tiene comportamiento paramagnético se conoce como temperatura de Curie para materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos, y como temperatura de Néel para materiales antiferromagnéticos.

Como ejemplos de materiales ferromagnéticos tenemos al hierro, cobalto y níquel; entre los materiales ferrimagnéticos encontramos a la magnetita y titanomagnetitas, y como materiales antiferromagnéticos la hematita es el mineral más común.

III.3.- Magnetismo de Rocas.

Las rocas de la corteza terrestre tienen características magnéticas similares a la de los materiales descritos como diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos (ver fig. 3.3), pero presentan comportamientos magnéticos diferentes que dependen de las propiedades de sus minerales constituyentes y de la presencia de campos magnéticos. Dado que estos minerales están sujetos a la influencia del campo magnético terrestre, todos ellos exhiben cierto comportamiento con respecto a éste campo, ya sea adquiriendo magnetización inducida, o teniendo un efecto contrario o repelente, o bien, permaneciendo más o menos indiferente a su presencia.

El magnetismo de las rocas de la corteza terrestre está definido, tanto en intensidad como en dirección, por las componentes correspondientes a la MRN y la magnetización inducida (J_i); en donde la J_i requiere de la presencia de un campo aplicado y la MRN no requiere de la presencia de un campo. Es decir, la magnetización total de la roca está dada por la suma vectorial

$$J_t = J_i + J_r \quad \dots (3.3)$$

en donde $J_i = k H$ es la magnetización inducida y J_r (MRN) es la magnetización remanente natural (ver fig. 3.4).

Cada grano de material magnético en una roca, consiste de uno o más dominios magnéticos y aunque las direcciones de magnetización son diferentes en dominios diferentes, la intensidad de magnetización por unidad de volumen y la magnetización espontánea J_s , es la misma en todos los dominios del mismo mineral. Cuantitativamente J_s disminuye con incrementos en la temperatura y desaparece para la temperatura de Curie.

Generalmente granos pequeños constan de dominios simples y, en ausencia de un campo magnético externo, la dirección de magnetización en cada dominio estará a lo largo de uno de los distintos ejes preferenciales. Las direcciones de estos ejes preferentes y los términos altos de energía magnética que los separa, son determinados por la forma de los granos, la anisotropía cristalina del mineral, o ambas. En un campo magnético aplicado, con incrementos de intensidad, la dirección de magnetización en el grano es anulada con la fuerza de los ejes preferenciales, hacia la dirección del campo. Si la energía suministrada por el campo aplicado no es más alta que el término de energía magnética, la dirección de magnetización regresa a su posición anterior cuando el campo es retirado. Esta magnetización, la cual es reversible y depende del campo aplicado, es por definición una magnetización inducida.

El coeficiente de Koenigsberger ($Q=J_r/J_i$) determina que tanta es la aportación del vector J_r a la magnetización total. Valores de $Q \gg 1$ se encuentran en rocas volcánicas.

III.A.- Paleomagnetismo.

El sustrato fundamental de toda investigación paleomagnética radica en cuantificar y estudiar la estabilidad de la MRN.

A grandes rasgos la metodología paleomagnética consiste de dos tipos de trabajo: de campo y laboratorio. En el primero (explicado arriba) nos proveemos del material de estudio (muestras de roca que pueden ser de núcleos y/o de bloque) y en el segundo preparamos las muestras, de forma que se encuentren en condiciones para ser trabajadas con los instrumentos apropiados y poder aplicarles los procesos de medición y de "lavado" magnético más pertinentes. Posteriormente los datos obtenidos se procesan e interpretan, dependiendo de los objetivos que se persiguen.

A continuación y de manera breve se expone una revisión de las propiedades y técnicas que se manejan en el Paleomagnetismo.

III.4.1.- Magnetismo Remanente Natural.

Como se ha mencionado arriba, la MRN de las rocas va a depender de su composición mineral, especialmente de la cantidad de ciertos sulfuros y óxidos de hierro-titanio, así como de las características del CGM, tanto en el momento de su formación como durante su historia geológica.

Las rocas ya sean ígneas, metamórficas o sedimentarias, pueden variar sus propiedades magnéticas por procesos geológicos que generan cambios internos, desde pequeños hasta complejos, en su estructura y composición. Asimismo, el efecto de éstos cambios puede ser un volumen variable, desde local hasta la formación de roca completa.

En el presente campo magnético (polaridad normal), las anomalías dipolares varían con la inclinación magnética (ver fig.3.5). En el caso de campos con polaridad opuesta (reversa) se tendría el patrón opuesto al de la fig. 3.5. Los cambios de polaridad son una característica del CGM en el tiempo geológico y se han documentado en estudios paleomagnéticos (ver fig. 3.6). La MRN, al llevar un registro del CGM presente al tiempo de adquisición, puede tener cualquiera de éstas polaridades: normal o reversa, o bien intermedia.

La responsable de la anomalía magnética es la magnetización total (J_t) que como ya mencioné, es la suma de la J_r y J_i ; de donde si la $|J_r| \gg |J_i|$ y de polaridad reversa, J_t será de polaridad intermedia o reversa, dependiendo de sus magnitudes relativas. Esta es una de las causas posibles de anomalías dipolares oblicuas o invertidas.

La MRN es la suma vectorial de varios magnetismos remanentes de orígenes variados, especialmente el magnetismo remanente primario (MRP), adquirido al tiempo de formación de la roca, y del magnetismo remanente secundario (MRs) adquiridos con posterioridad.

Comunmente se encontrará que en las rocas ígneas, la componente de mayor participación en la MRN es el magnetismo remanente térmico (MRT) que se adquiere al momento de enfriamiento del magma, desde temperaturas superiores a la de Curie hasta la temperatura ambiente. En términos generales la dirección del MRT es paralela a la del CGM; cuando éste era reverso, es obvio que su MR no depende del material, sino del propio campo existente. Aunque se han reportado casos, en que el MRT es reverso al CGM (autoreversión), por ejemplo el caso de las Dacitas del monte Heruna en Japón (Nagata, 1953). Además el MRT es estable, resiste procesos de desmagnetización y posee factores de relajación pequeños, por lo que a temperatura ambiente permanece estable.

III.4.2.- Otros tipos de Magnetizaciones Remanentes.

- MR Químico (MRQ).- Generado por procesos químicos de cristalización, oxidación, o de metamorfismo, que ocurren a temperaturas abajo de la de Curie. Cabe puntualizar, que en rocas sedimentarias continentales (areniscas, lutitas y limolitas rojas), el MRQ es la componente principal de la MRN, con una estabilidad comparable a la MRT.

- **MR Depositional (MRD).**- Generada por la orientación de las partículas magnéticas bajo un campo magnético durante los procesos de precipitación y deposición de los residuos del intemperismo y la erosión; su estabilidad depende del tamaño del grano de los sedimentos y del proceso de depósito.

- **MR Viscosa (MRV).**- Es la adquirida por la exposición de largos periodos de tiempo a un campo magnético, el cual depende de las propiedades del material y el tiempo de exposición.

- **MR Isotérmica (MRI).**- Se genera en presencia de un campo magnético a temperatura constante e inferior a la de Curie. Su intensidad es proporcional a la del campo magnético expuesto, bajo límite de saturación y en general es menor que la MRT (Nagata, 1961).

- **MR Piezométrica (MRP).**- Producida por efectos de magnetostricción generados por esfuerzos en las rocas, depende de las características del material y la orientación de los esfuerzos.

- **MR Anisotérica (MRA).**- Producido por la presencia de dos campos magnéticos, uno de tipo constante (directo) y otro de polaridad variable y decreciente (alternando-decreciente), regularmente se origina en el laboratorio, durante ensayos de estabilidad de la MRN.

RL4.3.- Minerales Magnéticos.

Los minerales responsables para las propiedades magnéticas de las rocas están predominantemente dentro del sistema Ternario $FeO-TiO_2-Fe_2O_3$ (ver fig. 3.7). Otros minerales relevantes son: hidróxidos de Hierro, sulfuros de Hierro y minerales como Níquel, Cobre, Hierro, Cromo, Manganeso, y Titanio.

La serie Pseudobroquita ortorrómbica es paramagnética. Dentro de los óxidos de Fe y Ti se tiene la serie Ulvöspinel-Magnetita (mejor conocidas como titanomagnetitas) y de limonita-Hematita (litanohematitas), en las cuales se tienen los minerales de magnetita y hematita respectivamente. La intensidad máxima de magnetización remanente (saturación) es mayor para la magnetita que para los otros minerales magnéticos.

La intensidad de magnetización remanente y la susceptibilidad varían con la composición, tamaño de grano (dominio magnético) y grado de oxidación (fig. 3.7 y 3.8). De acuerdo al tamaño del grano se tienen diferentes comportamientos de dominio magnético, de los cuales los de mayor intensidad y estabilidad de MR son los de dominio sencillo (SD). Partículas de SD (litanomagnetitas) son comunes en rocas volcánicas (basaltos, andositas, etc.), lo que produce intensidades altas de magnetización remanente.

III.4.4.- Estabilidad de la MRN.

Un estudio sobre la estabilidad de la MRN consiste en determinar mediante ciertos procedimientos si nuestro registro magnético, esta compuesto de una componente estable, que se preserve aún en pasos de lavado magnético.

Para este proceso de suma importancia en los estudios paleomagnéticos, se tienen dos procedimientos usuales: pruebas de campo y de laboratorio.

III.4.4.1.- Pruebas de campo.

En el trabajo de Graham (1949), se estableció la forma de aplicar varias de las pruebas que actualmente se emplean para evaluar el carácter primario de la magnetización.

Se tienen: la prueba del plegamiento, la del contacto quemado, la de estratos plegados, la de consistencia de direcciones, la de reversiones, la de secuencia de polaridades y los estudios de rocas fracturadas (McElhinny y Gough, 1962 y McMurry, 1970).

III.4.4.2.- Pruebas de laboratorio.

Estas pruebas, además de proporcionarnos la estabilidad de la MRN, nos permiten obtener la probable MRp al eliminar las componentes secundarias, así como poder identificar los minerales magnéticos que componen a las rocas.

Entre estas pruebas se tienen:

- **Desmagnetización por Campos Magnéticos Alternos Decrecientes (DCMAD).**- Consiste en la aplicación por pesos progresivos de un campo magnético decreciente a un espécimen, el cual lo rotamos en tres posiciones diferentes y normales entre sí, para cada peso.

La aplicación de CMAD tienen como finalidad eliminar los momentos magnéticos de la MRN de acuerdo a sus durezas y en forma proporcional a la intensidad máxima del CM aplicado. Dicho procedimiento debe realizarse en la ausencia de CM directos porque de lo contrario tendremos la presencia indeseable de la MRA en nuestro espécimen (véase III.4.2).

La dureza magnética de una roca depende de las fuerzas coercitivas de sus dominios; estas fuerzas varían de decenas a miles de oersteds y dependen del tamaño, forma y alineamiento de los granos, de la clase de material y de sus imperfecciones cristalinas (Parry, 1967).

La MRN de una roca puede considerarse en el caso más general como la resultante de varias MR (MRp y MRs) de diferentes magnitudes y direcciones. Durante el proceso de análisis de la estabilidad del MRN de una roca, tanto la dirección como la intensidad pueden cambiar luego de cada etapa de lavado.

La MR que presenta mayor resistencia al proceso de DCMD se lo denomina "dura" y al caso contrario se lo llama "blanda". Muchas de las veces cuando se presenta el primer caso se dice que se trata de la MRp y cuando se tiene la segunda se dice que se trata de la MRs, aunque cabe aclarar que se puede dar el caso contrario.

La MR de la magnetita, de los minerales de la serie titanomagnetitas y de la pirrotita, desaparecen bajo la acción de CMAD de 1 a 100 mT, en cambio minerales de la serie Ilmeno-hematita, lo hacen para campos mayores por lo que su MR es dura (coercitividad alta).

En el caso del presente estudio, aplicamos nueve pasos desde 5 hasta 95 mT a los especímenes piloto. Los resultados de tal desmagnetización se presentan a través de gráficas de intensidad normalizada (J/J_0) vs. campo aplicado, en mT. Utilizando un Desmagnetizador de especímenes por CMAD, modelo GSD-5 de la Schonstedt Instrument Company con seis posibilidades de relación de decaimiento por medio ciclo y con capacidad de generar campos de hasta 100 mT.

- **Desmagnetización Térmica.**- En esta prueba, los especímenes son calentados a diferentes temperaturas, desde la ambiental hasta los 600-700°C. Con el incremento de temperatura, los minerales con temperaturas críticas (de Curie o Néel) iguales o menores, pierden su magnetización. Al enfriarse, si el campo magnético es cero, el espécimen queda parcialmente desmagnetizado.

El MRT adquirido en un determinado rango de temperaturas es independiente del adquirido en otro intervalo diferente de temperaturas, por lo que el MRT total (adquirido entre la temperatura de Curie y la ambiente) es la suma de varios MRT parciales (MRTp) (Thoffler, 1951).

Esto implica, que al igual que el proceso anterior, la intensidad y la dirección del espécimen van cambiando "continuamente", es decir se van eliminando diferentes MRTp conforme se van variando los pasos.

En el presente estudio, por problemas técnicos, sólo se ocuparon dos y tres pasos en los especímenes piloto (230-330 y 440°C y 330 y 440°C). Para ésto, se utilizó un Desmagnetizador Térmico de especímenes, Model TSD-1 de la Schonstedt Instrument Company.

- **Desmagnetización Química.**- Este proceso se utiliza frecuentemente para el estudio de sedimentos rojos (su coloración se debe a la presencia de Hematitas). Esta técnica fue desarrollada por Collinson (1965). A grandes rasgos el proceso consiste en introducir los especímenes en una solución de ácido clorhídrico concentrado, por periodos variables, desde unos minutos hasta varias horas; luego son lavados cuidadosamente y secados para medirles su magnetización residual. Como los minerales que contienen la MR van siendo removidos, la muestra se desmagnetiza.

- Desmagnetización a bajas temperaturas.- Consiste en enfriar al espécimen hasta alcanzar temperaturas cercanas a la del nitrógeno líquido (-196°C), posteriormente se les deja alcanzar la temperatura ambiente en un espacio libre de campo magnético. La desmagnetización se debería a una disminución de la anisotropía de los cristales ferromagnéticos resultante de tan bajas temperaturas; en efecto, la desmagnetización es más efectiva cuando se logran alcanzar temperaturas en la cual la anisotropía magnetocristalina (y por lo tanto la fuerza coercitiva) se reduce a cero.

Además se cuenta con las pruebas concernientes a las propiedades magnéticas de las rocas, como son: fuerzas coercitivas, temperaturas de Curie, tiempos de relajación, coeficientes de Koenigsborger, susceptibilidad, anisotropía magnética.

En el presente estudio utilizamos la magnetización isotermal-espectro de fuerzas coercitivas, cálculo del factor de Koenigsborger y medición de la susceptibilidad; ésta última fue medida con un susceptímetro magnético modelo MS2 de la Bartington Instruments LTD.

La magnetización Isotermal-Espectro de coercitividad.- es una prueba de la adquisición de la MRI, que permite distinguir entre minerales de la serie titanomagnetitas e ilmeno-hematitas, aún en los casos en que se tengan minerales de ambas series. Consiste en aplicar campos magnéticos directos de intensidad variable y medir la MRI resultante en cada paso.

En el presente estudio, la magnetización isotermal se aplicó a los especímenes piloto, mediante 12 y 15 pasos, desde 5 a 830 mT.

III.4.5.- Presentación de datos.

En las investigaciones paleomagnéticas los datos que se presentan usualmente son las propiedades magnéticas de las rocas, los vectores de las magnetizaciones remanentes con sus respectivos procesos de "lavado" y la posición de los polos.

Respecto a las direcciones de los vectores de magnetización y coordenadas polares involucran relaciones espaciales sobre superficies esféricas y estas deben representarse en un plano, es decir utilizando proyecciones (pueden ser equiareales o estereográficas).

Además la presentación de los datos implica un tratamiento estadístico, en la medida de que trabajamos con poblaciones, de las cuales deseamos obtener una serie de características. En paleomagnetismo el esquema de muestreo depende del objetivo del estudio, no obstante, en todos los casos éste debe ser lo más uniforme posible, estadísticamente hablando.

Para caracterizar a los vectores de magnetización se requiere conocer la declinación, la inclinación y la intensidad. Para el estudio de las direcciones usualmente se emplea el método estadístico de Fisher (1953).

Este método nos permite analizar las direcciones; a cada dato se le da un peso unitario y se le representa como un vector de longitud unitaria, lo que equivaldría a un punto en una esfera de radio unitario. La dirección del vector suma de los N vectores unitarios correspondientes a los N especímenes de la muestra es la mejor estimación de la verdadera dirección de la MRN. de la misma, siempre y cuando los vectores satisfagan la distribución Fisheriana.

Las direcciones de las MRN de los especímenes, en una esfera unitaria -de acuerdo a Fisher- están distribuidos por la densidad de probabilidad:

$$P_A dA = \frac{k}{4\pi \sinh k} e^{k \cos \theta} \sin \theta d\xi d\theta \dots (3.1)$$

donde ξ y θ son las coordenadas polares del elemento de área dA (θ es la desviación angular respecto del valor medio de la población, ξ , es el ángulo azimutal) y k es el parámetro de precisión. El parámetro k determina las características de la población; si $k=0$, las direcciones están distribuidas errática y uniformemente sobre la esfera; si k es grande, las direcciones estarán concentradas en un pequeño sector de la esfera próximas a la dirección promedio verdadera.

La dirección media puede calcularse de:

$$D = \tan^{-1} \frac{\sum m_i}{\sum l_i R} \dots (3.2) \quad I = \sin^{-1} \frac{\sum n_i}{\sum l_i R} \dots (3.3)$$

donde:

D = declinación media; I = inclinación media; (l_i, m_i, n_i) son los cosenos directores de la i -ésima dirección.

$$l_i = \cos D_i \cos I_i \quad (\text{componente norte}) \dots (3.4)$$

$$m_i = \sin D_i \cos I_i \quad (\text{componente este}) \dots (3.5)$$

$$n_i = \sin I_i \quad (\text{componente vertical}) \dots (3.6)$$

$$R = \text{resultante} = \{(\sum l_i)^2 + (\sum m_i)^2 + (\sum n_i)^2\}^{1/2} \dots (3.7)$$

el parámetro k se estima por:

$$K = N - 1 / N - R \dots (3.8)$$

donde N es el número de direcciones estudiadas.

Para poder estimar cualitativa y cuantitativamente el grado de dispersión es posible calcular el semiángulo " $\alpha_{(1-p)}$ " de un cono circular situado alrededor de R dentro del cual se encuentra la verdadera dirección promedio de la población con un nivel de probabilidad $(1-p)$, el cual, cuando $k > 3$, viene dado por:

$$\cos \alpha_{(1-p)} = 1 - (N-R) / R \{ (1/p)^{1/(n-1)} - 1 \} \quad \dots (3.9)$$

En paleomagnetismo, se ha adoptado $P=0.05$ para calcular " α "; ello significa que existe una probabilidad en 20 de que la verdadera dirección de la población esté fuera del cono de confianza del semiángulo α_{95} alrededor de R.

IV.- ESTUDIO AEROMAGNETOMETRICO.

La prospección magnetométrica es uno de los varios métodos geofísicos de exploración, mediante el cual podemos conocer las propiedades magnéticas, estructura y forma de los cuerpos anómalos. Se puede realizar sobre la superficie de la tierra, en el mar o en el aire. Dichas variantes se seleccionan de acuerdo a los objetivos de exploración y del área donde se efectuará el estudio. Por ejemplo, en la exploración petrolera, generalmente se realizan levantamientos aeromagnetométricos con el fin de cuantificar la profundidad aproximada y el carácter de las rocas del basamento. En la exploración de minerales (como la que nos compete ahora), para un reconocimiento del área de interés se usan levantamientos aeromagnéticos y para estudios más detallados, se verifican anomalías aeromagnéticas con levantamientos terrestres.

IV.1.- Aeromagnetometría.

Como lo señale en el capítulo anterior, el estudio previo con el que se contaba para investigar la zona de interés, era un levantamiento aeromagnético con altura de vuelo de 250 m. Este fue nuestro punto de partida para seleccionar la zona de estudio.

Arriba mencionamos, que la selección de áreas de estudio en trabajos mineros, se hace en base a estudios previos de geología y levantamientos aeromagnométricos, éste último es efectivo, rápido y económico en la configuración de las anomalías magnéticas regionales. Los levantamientos aeromagnéticos pueden efectuarse con los criterios de: reconocimiento, semidetalle y detalle.

El plan de vuelo depende de la magnitud y extensión en superficie de las anomalías buscadas. Generalmente el plan de vuelo consiste en una red de vueltas alrededor de las cuales puede ser eliminado, mediante un ajuste adecuado, cualquier diferencia de cierre debido a la deriva del instrumento o a variaciones diurnas. Es recomendable repetir las lecturas sobre varias estaciones durante un día de vuelo, lo que puede

ser hecho con un magnetómetro sobre tierra, que va registrando la variación diurna o usando una línea base en el contorno del área. El levantamiento se intenta realizar a una altura de vuelo constante (vuelo de contorno), ya que los cambios de altura afectan las mediciones.

Uno de los problemas con los levantamientos aéreos es correlacionar las lecturas con la posición del avión respecto a la tierra en el momento en que las lecturas son tomadas. Uno de los mecanismos que se utilizan para subsanar dicho problema es que el piloto vaya fotografiando a cada cierto tiempo el área levantada. Las fotos y los registros magnéticos serán controlados simultáneamente.

Generalmente en este tipo de levantamiento las variaciones magnéticas que se miden son de campo total.

Una de las ventajas del método descrito, es que los efectos de deriva de los instrumentos y de la variación diurna son mínimos, debido a la velocidad con que se realiza la exploración. Una desventaja es la precisión de los resultados que están siempre limitados por la exactitud del mapa en que se transcriben los datos magnéticos.

IV.2.- Aeromagnetometría y ambientes minerales.

En los estudios aeromagnetométricos se reconocen la distribución de los minerales magnéticos en la corteza terrestre, siendo los principales: la magnetita, titanomagnetita, titanohematita, magnetita, pirrotita y hierro masivo o aleaciones de Fe-Co-Ni. Estos minerales son los causantes principales para que se produzcan las anomalías, debido a sus susceptibilidades magnéticas anormalmente grandes o bien a magnetizaciones remanentes altas.

De los minerales magnéticos que ocurren en la corteza, la magnetita es la más abundante y la que más efecto tiene sobre las anomalías magnéticas. A escala global los otros pudieran ser ignorados. Por esta razón un estudio aeromagnetométrico, de manera concreta y práctica, mapea la magnetita que se encuentra en el área de prospección. Y la interpretación en un sentido más amplio es el delineamiento de inferencias acerca de la geología y el potencial mineral de una región a partir de la distribución de la magnetita.

La magnetita es un mineral accesorio que está presente en muchas rocas pero en pequeñas cantidades (raramente el 1% del volumen total de la roca). De éste modo las propiedades magnéticas no pueden identificar por sí mismas al tipo de roca, al menos, no en un sistema de clasificación convencional que está basado principalmente en una mineralogía de silicatos y carbonatos. Además, hay cambios en los niveles de concentración de magnetita que raramente correlacionan con divisiones litológicas que como ya se dijo, están definidas por la nomenclatura convencional. Bajo estas consideraciones es bastante claro que el intento de inferir límites geológicos únicamente por medio de aeromagnetométrico sería incorrecto.

IV.3.- Interpretación magnética.

El objetivo fundamental de éste proceso es la de determinar el cuerpo anómalo que nos produce una cierta anomalía magnética. Es decir, su propósito es determinar la geometría del cuerpo, profundidad a la que se encuentra y sus características magnéticas. Para dicho propósito se han desarrollado diferentes métodos de interpretación, los cuales pueden ser cualitativos o cuantitativos. Los primeros se basan en métodos empíricos que proporcionan una idea vaga 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 gravimétricos 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 la roca (ya que la magnetización no siempre está orientada según el CGM), la naturaleza bipolar de las anomalías que da origen a ciertas complicaciones para interpretar las anomalías cuantitativamente.

En general la forma de la anomalía depende de factores tales como: geometría del cuerpo, dirección del CGM del área de estudio, dirección de polarización de las rocas que constituyen el cuerpo, orientación del cuerpo con respecto a la dirección del CGM, la orientación de la línea de observación (puede ser línea de vuelo) respecto al eje del cuerpo etc; estos factores deben ser considerados en la interpretación.

Este proceso, consiste de tres pasos esenciales: análisis de la calidad de datos, eliminación de los efectos regionales e interpretación de la anomalía de interés. Cabe aclarar que estos pasos están íntimamente relacionados entre sí.

En el primer paso se trata de examinar que los parámetros de operación de campo sean los adecuados para resolver el problema en cuestión (altura de vuelo, conformidad del espaciamento y dirección de las líneas de vuelo, disponibilidad de mapas topográficos, tipo de instrumentación empleada en la medición, etc.).

El segundo paso, la eliminación de los efectos regionales, se realiza normalmente restando el valor del CGM teórico al mapa de intensidad magnética total observada. Otro mecanismo es la utilización de operadores matemáticos como los armónicos esféricos.

Los operadores matemáticos diseñados para filtrar y resolver anomalías residuales de mapas magnéticos se dividen en dos tipos; unos son usados en el dominio del espacio, utilizando operadores convolucionales y otros en el dominio de la frecuencia, empleando la transformada de Fourier. En el presente trabajo se utilizaron los siguientes operadores: reducción al polo, segunda derivada, continuaciones ascendentes y descendentes. Definiendo brevemente dichos operadores, se tiene:

IV.3.1.- Reducción al Polo.- Uno de los problemas en la interpretación de datos magnéticos es la característica de que las anomalías aparecen descontradas respecto a las estructuras que lo producen. Esta asimetría característica es responsable de la complejidad de los mapas magnéticos y obedece a que el campo magnético se asocia a fuerzas tanto de repulsión como de atracción. Por si esto fuera poco, las anomalías magnéticas (como lo vimos en el capítulo anterior) están generadas por la Ji y la MRN, con inclinaciones y declinaciones que varían con la posición, debido al efecto dipolar del CGM.

En la región de los polos magnéticos de nuestro planeta, las dificultades anteriormente descritas, se minimizan debido a que el campo normal se comporta como vortical y a menudo la MRN también lo es (Baranov, 1975), por esta razón, si las fuentes geológicas pudieran ser físicamente "llevadas a los polos", las anomalías que se producirían, serían en varios sentidos semejantes a las gravimétricas, disminuyendo así uno de los problemas en la interpretación magnética.

IV.3.2.- Segunda Derivada.- Generalmente los operadores que emplean las derivadas nos permiten resolver las componentes de frecuencia alta del campo magnético.

Durante la década de los 40's y 50's el método de la segunda derivada, fue tal vez el diseño más común para transformar mapas potenciales a nuevos mapas denominados: mapas derivados. La ayuda fundamental del método es enfatizar "presumiblemente" las características debido a las estructuras geológicas de importancia práctica. Es decir dicho operador funciona como un filtro pesa altas. (Meskó, 1984).

IV.3.3.- Continuaciones Ascendentes y Descendentes.- Si un campo potencial se conoce en cierto plano, digamos $z=0$, mediante las operaciones de continuación y bajo ciertas condiciones puede conocerse en otros planos arriba o abajo del plano original.

Si consideramos dos cuerpos que producen sus respectivas anomalías y si la distancia que los separa es relativamente corta en comparación a su profundidad, entonces habrá traslape de sus campos. Considerando que se aloja el plano de observación, difícilmente se podrá distinguir alguna de las anomalías; si en cambio el plano se aproxima a los cuerpos, los efectos anómalos se definirán aún más claramente. Por lo tanto, de manera elemental, la continuación descendente nos permite aumentar la resolución de los mapas magnéticos, es decir, nos ayuda a resaltar las frecuencias altas, mientras que la continuación ascendente nos permite suavizar los campos, es decir nos ayuda a resaltar las frecuencias bajas.

En el tercero y último paso, ya cuando el mapa de intensidad total ha sido procesado con los operadores anteriores, la geología del subsuelo que causa la anomalía magnética, puede ser inferida. Para esto, varios factores se deben considerar en el análisis.

Efectos de la inclinación y declinación magnética local.

Las anomalías magnéticas están relacionadas con la susceptibilidad y la geometría del cuerpo anómalo

así como con la inclinación y declinación magnética local. Es importante estudiar las curvas de la anomalía para cuerpos teóricos en la latitud magnética local para obtener una orientación para la localización de la fuente anómala.

Análisis cualitativo.

En muchos de los casos los mapas magnéticos pueden ser cualitativamente interpretados para determinar la localización de fallas, de una cuenca sedimentaria, del basamento magnético, etc. Debe tomarse en cuenta que los mapas magnéticos en sí, no son mapas del basamento, por lo tanto las anomalías grandes no son debidas probablemente a la estructura del basamento y que algunas de las anomalías más pequeñas pueden ser las más significativas, desde un punto de vista estructural. En este tipo de interpretación, una anomalía puede representar un relieve de basamento o tan sólo una variación de la susceptibilidad.

Estimación de la profundidad.

Regularmente uno de los usos más generales del análisis de datos magnéticos, es la estimación de la profundidad, del basamento o del cuerpo geológico de interés económico. Sin embargo, el cálculo de la profundidad magnética tiene una incertidumbre igual o mayor del 10 %.

Para obtener la profundidad de un cuerpo anómalo o del basamento magnético se pueden utilizar los métodos empíricos que utilizan el criterio de pendientes o ancho de la anomalía y el análisis espectral computarizado, respectivamente.

Modelado.

El objetivo de la modelación se logra por dos caminos importantes, la modelación directa o inversa. La primera se refiere a todo procedimiento en el cual una "curva anómala" de un cierto modelo, se calcula para una fuente de forma arbitraria. Por el contrario, la modelación inversa se refiere a cualquier proceso en el cual se pretende determinar la naturaleza de la fuente directamente a partir de una anomalía observada.

Cabe aclarar, que la modelación en la interpretación de anomalías magnéticas, no puede asegurar una solución única debido al problema fundamental de la ambigüedad o la falta de unicidad en la solución.

Aunque sobre la base de la información geológica u otros datos de índole geofísico, es frecuente deshechar algunos modelos, los cuales al ser más complicados son más difíciles de eliminar. Si bien es cierto que la ambigüedad no es del todo salvable, sí la podemos disminuir teniendo presente los siguientes criterios:

- a) Un modelo consistente resulta cuando varias anomalías son interpretadas en una área dada, y
- b) El modelo será geológicamente aceptable y consistente en la medida de cotejar éste con información aportada por otros métodos geofísicos.

Por esta razón, es importante tener presente, que nuestras interpretaciones deben ser vistas como estudios predictivos más que como respuestas definitivas.

IV.4.- La MRN y la interpretación de datos magnetométricos.

Como mencionamos en el tema III.3 los datos paleomagnéticos son de gran utilidad en la interpretación de anomalías magnéticas, puesto que nos proporcionan información sobre la dirección e intensidad de la MRN y la susceptibilidad.

El magnetismo inducido (J_i) por lo general se considera paralelo asumiendo que las contribuciones de campos magnéticos locales, efectos de anisotropía y de demagnetización son pequeños y proporcional al CGM, lo cual sólo es válido para campos de intensidad baja, como el terrestre. Por otro lado, la MRN, está presente aún en ausencia del CGM, y puede tener dirección, sentido y magnitud distinta al CGM.

En general, en la interpretación magnética sólo se considera la J_i paralela al CGM, mientras que la MRN se lo considera nula o de contribución despreciable. De esta forma, es frecuente encontrar casos en los cuales es difícil explicar las anomalías asumiendo sólo la J_i . Entre los casos más comunes tenemos:

- a) Anomalías dipolares invertidas, es decir con el sentido de su máximo y mínimo contrario al que debería tener por su latitud magnética (véase la figura 3.5).
- b) Anomalías dipolares invertidas o normales, con orientaciones distintas a la orientación norte-sur.
- c) Anomalías de alta intensidad, sobre estructuras conocidas que presentan susceptibilidades magnéticas bajas y
- d) Anomalías de intensidad baja (o no detectables) sobre estructuras conocidas que presentan susceptibilidades magnéticas altas (incluyendo depósitos de Fe con altos contenidos de Magnetita).

En los casos anteriormente mencionados, se requiere conocer la MRN para poder realizar dos opciones: modelos e interpretaciones correctas de datos magnetométricos.

De la ecuación (3.3), sabemos que la J_i es una función del contenido y tipo de minerales magnéticos presentes en la roca, la cual está representada por la susceptibilidad magnética "k". La J_i como ya dijimos, es la suma vectorial de diferentes componentes de MRN adquiridas durante la historia de la roca y depende de la intensidad y dirección del CGM. La intensidad y dirección del CGM varían con distintos períodos que van desde fracciones de segundo hasta cientos de millones de años.

En la figura 4.1 se puede observar la importancia que tiene la dirección e intensidad de la MRN, en caso de que dicho vector sea: a) igual y opuesto; b) perpendicular; c) igual y del mismo sentido que el vector J_i .

IV.5.- Descripción cualitativa del mapa aeromagnetométrico.

Las anomalías aeromagnéticas se encuentran localizadas sobre una zona amplia del estado de Guerrero. Si dividimos al plano topográfico de escala 1:50000 correspondiente a la región de "Las Habillas" (carta E14C25) en cuatro partes iguales, correspondería a la parte suroccidental. Esta zona abarca un área aproximada de 178.50 km² que va desde los 17° 30' hasta los 17° 37' latitud norte y de los 100° 23' hasta los 100° 31' longitud oeste (ver fig. 4.2).

Pese a que la topografía de la zona es muy abrupta (ver cap. 2) y las anomalías observadas un tanto complejas y enmascaradas por una "frecuencia alta" persistente, se pueden distinguir en el mapa magnético algunas "alineaciones". Una alineación de mínimos que "corre" con un tendencia aproximada de SW-NE. "acompañada" en su parte inicial (SW) por un par de anomalías bipolares bien definidas, las cuales retomamos para ser interpretadas y que les asignamos la ubicación en la zona anómala 12-9-7. Al par de anomalías les asignamos el nombre de Azul (inferior) y Morado (superior) y a los respectivos perfiles de estudio los denominamos por sus dos primeras letras (perfil Az-Az' y Mo-Mo').

Rumbo al NE la región es un tanto compleja pero puede llegar a distinguirse también dos anomalías bipolares, a las que les hemos asignado la zona anómala 12-9-3. a las anomalías les hemos denominado como Negra (inferior) y Amarilla (superior) y a sus respectivos perfiles como Ne-Ne' y Am-Am'.

IV.6.- Análisis e interpretación de las anomalías de interés.

Para el análisis de nuestras anomalías utilizamos el paquete de procesamiento geofísico implementado por Soto-Cuervo (1989) y el modelado se realizó mediante el programa de modelación magnetométrica "Magpoly" (que utiliza el método bidimensional de Talwani) de la empresa Geosoft.

Para la aplicación de los operadores matemáticos, se digitalizó el mapa aeromagnetométrico con un espaciado de 250 m. Además, los perfiles tienen un espaciado equidistante de 100 m.

IV.6.1.- Anomalia IV (Azul).

Esta anomalía se encuentra localizada sobre uno de los afluentes intermitentes del río Yorbabuena en una zona de topografía muy abrupta, con elevaciones que van desde los 1500 a los 2100 m. s.n.m. Sus coordenadas geográficas van desde los 17° 30' 48" hasta los 17° 32' latitud Norte y de los 100° 28' 30" hasta los 100° 30' de longitud, abarcando un área aproximada de 6.5 km².

Se trata de una anomalía dipolar con un mínimo hacia el norte y un máximo hacia el sur, es decir del tipo normal. La diferencia de amplitud entre el máximo y el mínimo observado es de 4800 nanoteslas (nT) y la amplitud inferida por medio de un interpolador cúbico es de 5526 nT. La distancia de separación entre máximo y mínimo es de 1100 m. La orientación azimuthal entre el máximo y el mínimo es de 20° NE. Su

"striko" (orientación en planta del cuerpo anómalo) azimutal es de 290° . El perfil trazado (Az-Az') sobre la orientación azimutal tiene una longitud de 1850 m. (ver fig.4.3).

Del mapa de reducción al polo (ver fig. 4.4), puede observarse como la anomalía dipolar se reduce a un monopolo, permitiendo de forma aproximada la ubicación del cuerpo anómalo y de esta manera tener un criterio para modelarlo. La reducción presenta un valor máximo de 6500 nT que se ubica aproximadamente en la parte media de la densidad alta de las isolíneas del mapa original y cuya distancia en el perfil Az-Az', es de aproximadamente 1100 m.

El mapa de la segunda derivada (ver fig. 4.5) aproximadamente nos delimita la presencia de algunos cuerpos someros que pudieran estar encima del cuerpo principal.

La figura 4.6 representa la continuación ascendente a una unidad (250 m). Aquí puede observarse como la anomalía pierde su dipolaridad y se suaviza notablemente. Indicando que las frecuencias bajas al resaltarse y perder su forma original, inferen la presencia de un cuerpo anómalo que no se profundiza a más de 400 m.

La continuación descendente se observa en la fig. 4.7 y corresponde a una unidad. La anomalía al igual que en la anterior continuación, pierde su dipolaridad y presenta un mapa menos suavizado que el anterior. Posteriormente se realiza una continuación descendente con 0.4 de unidad (ver fig. 4.8) y se observa que la dipolaridad comienza a aparecer nuevamente; indicando con esto, que el cuerpo anómalo se encuentra a una profundidad menor de 100 m.

Finalmente, la aplicación de los operadores matemáticos, la información proporcionada por el estudio paleomagnético (respecto a la dirección de la MRN y sus propiedades magnéticas) y la forma y orientación de la anomalía, permiten estimar los parámetros geométricos y magnéticos del cuerpo anómalo. La forma dipolar y orientación de la anomalía puede modelarse con un cuerpo prismático o tabular, con una componente remanente de intensidad=14792 mA/m, declinación = 80.25° e inclinación = 20.15° y una componente inducida = 792 mA/m, declinación = 7.5° e inclinación = 44.642° . Con estos parámetros se trata de ajustar el mejor modelo que reproduzca la anomalía observada. Se probaron varios modelos, que permitieron evaluar los efectos relativos de las variaciones en los parámetros del cuerpo. En la gráfica 4.9 puede observarse el efecto total calculado, así como el efecto aislado del remanente e inducido. En la gráfica 4.10 puede verse el cuerpo anómalo propuesto, con forma de intrusivo, concretamente un dique; esto se fundamenta en la geología regional y superficial del área de estudio. El cuerpo propuesto tiene una profundidad aproximada (-) de 70 m, un ancho ~ de 100 m con una longitud ~ de 330 m y una inclinación de 125° .

El modelo propuesto, a partir del análisis cuantitativo de la anomalía azul (denominada anomalía IV para el modelado) posee una correspondencia buena, en términos de la ubicación, con el modelo propuesto en la vecina anomalía morada (denominada anomalía I).

IV.6.2.- Anomalía I (Morada).

La anomalía I, se localiza sobre las áreas laterales y el cauce del nacimiento del río Yerbabuena. La topografía sigue siendo la misma que en la anterior, con la diferencia de que las alturas tanto en la parte positiva como la negativa - de la anomalía - son simétricas y oscilan entre los 1900 a los 2500 m. s.n.m. Sus coordenadas geográficas aproximadamente son: $17^{\circ} 31' 29''$ hasta $17^{\circ} 33'$ de latitud norte y $100^{\circ} 27' 21''$ hasta $100^{\circ} 29' 20''$. Abarcando un área aproximada de 9.625 km².

Esta anomalía es claramente dipolar, con una distancia observada entre máximo y mínimo de 800 m. y de 1050 m. mediante interpolación; una diferencia de intensidad, inferida también por interpolación, de 2748 nT (la diferencia de intensidad observada es de 2400 nT). Tiene una orientación azimutal, de máximo a mínimo, de 90° (W-E) y un "strike" de 0° . En la dirección de su orientación, se trazó un perfil para modelarla, con una extensión de 2950 m. (Mo-Mo') (ver figura 4.11).

En la figura 4.12, se observa la reducción al polo de la anomalía I, que ubica a la masa anómala con un desplazamiento considerable hacia el norte y con un valor máximo de 2400 nT. De manera aproximada, la ubicación del cuerpo, sobre el perfil propuesto, estaría a 1900 m del origen del perfil.

La figura 4.13 representa el mapa de la segunda derivada. En éste, se puede observar un resalte notable de las frecuencias altas, llegándose a inferir la presencia de algunos cuerpos pequeños de poca profundidad y sobrepuestos a un cuerpo de dimensión mayor.

La continuación hacia arriba fue realizada para alturas de una, dos y tres unidades (250,500 y 750 m., respectivamente). Si observamos los tres mapas resultantes de éstas continuaciones (véase las figs. 4.14, 4.15 y 4.16) es notable observar que la anomalía dipolar conserva su forma, indicándonos que el cuerpo anómalo se proyecta a profundidades mayores de 750 m.

La continuación hacia abajo, se realizó para una y .4 unidades. Para la primera (ver fig. 4.17) la forma de la anomalía se conserva muy bien y para la segunda (ver fig. 4.18) la forma sigue conservándose excepto por la aparición de algunos cuerpos pequeños de poca profundidad, en su parte negativa.

En base a los resultados obtenidos por la aplicación de los operadores matemáticos, el estudio paleomagnético, las propiedades físicas, la forma y orientación de la anomalía observada (fig. 4.11) se estimaron los parámetros geométricos y magnéticos del cuerpo fuente de la anomalía. La forma dipolar y ante todo su orientación, permiten concluir - fundamentado en el cálculo del factor "Q", reportado en el estudio paleomagnético del capítulo siguiente - que la MRN es de importancia fundamental considerarla para la realización de una modelación cuantitativa de la anomalía.

La anomalía I, se puede modelar, al igual que la anterior, mediante la propuesta de un cuerpo prismático (dique), con una componente remanente igual a la anterior y una magnetización inducida de 678.5 mA/m, declinación $=7.5^{\circ}$ e inclinación de 44.642° . A partir de estos parámetros se trató de ajustar el modelo mejor,

que reproducirá nuestra anomalía observada. En la gráfica 4.19 se puede ver la anomalía calculada, considerando la MRN e inducida, y los efectos particulares considerando a cada una de las componentes de manera aislada. En la gráfica 4.20 se puede observar el cuerpo anómalo propuesto, con características de dique; a una profundidad de 260 m, un ancho de 70m, una longitud mayor de 800 m y una inclinación de 132°.

IV.6.3.- Anomalía II (Negra).

La anomalía se localiza sobre el "Filo mayor" del Cerro Costilla, alcanzando alturas de más de 3000 m. s.n.m. Sus coordenadas geográficas son: 17° 32' 26" -17° 34' de latitud Norte y 100° 23'- 100° 24' 33" de longitud Oeste. Abarca un área aproximada de 9 km².

La forma de la anomalía es dipolar y normal. Su dirección azimutal es de 54°, con una distancia entre máximo y mínimo de 1450 m en el perfil interpolado (en el observado es de 1437 m) y una diferencia de intensidad observada de 1300 nT o 1473 nT para la inferida por interpolación. El strike azimutal de la anomalía es de 324°. Sobre su dirección azimutal, se trazó el perfil Ne-Ne' con una longitud de 2500 m, para realizar la interpretación cuantitativa (ver fig. 4.21).

En la figura 4.22 se observa el mapa de la reducción al polo, en el cual se puede apreciar un valor máximo de 1600 nT localizado un poco arriba del perfil trazado, permitiéndome inferir la ubicación del cuerpo anómalo de manera aproximada (aproximadamente a los 1500 m.).

En la figura 4.23 podemos apreciar la segunda derivada, que nos resalta las frecuencias altas y que de manera gruesa nos delimita una serie de cuerpos pequeños de profundidad somera, colocados sobre un cuerpo de dimensiones mayores.

La continuación hacia arriba se realizó para una y tres unidades (250 y 750 m. respectivamente). Para una unidad, la forma de la anomalía se mantiene y para tres sucede casi lo mismo, indicándonos esto, que el cuerpo de interés se proyecta a una profundidad considerable (obsérvese las figuras 4.24 y 4.25), tal vez superior a los 800 m.

Para la continuación hacia abajo, utilizamos una y .4 unidades (véase la fig. 4.26 y 4.27) permitiéndonos inferir para la primera, que se trata de un cuerpo profundo, debido a que la tendencia de la anomalía se mantiene, aunque suavizada; en cambio para la segunda, se resaltan un tanto las frecuencias altas que hacen que la anomalía se agudice, lográndose a resaltar la presencia de otro dipolo hacia el NE, amén de que su forma casi se mantiene, indicándonos con esto, que tal vez, el cuerpo profundo se proyecta cerca de la superficie.

Sin embargo, para el trabajo de interpretación cuantitativa, los procesos anteriores (la aplicación de los operadores matemáticos) y los resultados del estudio paleomagnético, que en el próximo capítulo reporto y discuto ampliamente, me han permitido estimar los parámetros geométricos y magnéticos del posible cuerpo fuente de la anomalía observada.

Respetando un tanto las características geológicas superficiales, la forma dipolar y orientación de la anomalía permiten modelar la misma mediante un cuerpo prismático o tabular, que bien podría ser un intrusivo ígneo de tipo dique. Dicho cuerpo tendría una componente remanente con los siguientes parámetros: intensidad = 14792 mA/m, declinación = 80.25° o inclinación = 20 15°. Su componente inducida tiene una intensidad = 528 mA/m, declinación = 7.5° o inclinación = 44.642°. Con estos parámetros, se trató de ajustar el modelo más apropiado que reproduciera la anomalía observada; al igual que en las interpretaciones anteriores, se probaron varios modelos, que permitieron evaluar los efectos relativos de las variaciones en los parámetros del cuerpo. Cabe mencionar que la anomalía calculada, pudo haberse restringido de manera muy conservadora a la información proporcionada por el procesamiento digital de la anomalía observada, sin embargo la información paleomagnética y particularmente las características de la anomalía (en especial su longitud de onda) fueron criterios importantes para poder modelar el cuerpo anómalo. En la gráfica 4.28 se puede observar la comparación entre la anomalía observada, la calculada por efecto total y la provocada por cada una de las componentes (J_i y J_r). En la gráfica 4.29 se puede ver el cuerpo anómalo propuesto, el cual presenta las características de un dique, con una profundidad de 360 m, una longitud de 1000 m, un ancho de 80 m y una inclinación de 134°.

IV.6.4.- Anomalía III (Amarilla).

La anomalía se localiza sobre el cauce del río intermitente "Lomillo" y cerca del caserío "La Mozimba". Sus diferencias altimétricas oscilan entre los 2000 y 3000 m. s.n.m. La localización geográfica es de 17° 33' 47" - 17° 35' 16" de latitud Norte y de 100° 24' 25" - 100° 26' longitud Oeste, ocupando un área aproximada de 7.6 km².

En la fig 4.30 puede apreciarse la forma dipolar normal de la anomalía, con una orientación azimutal de 45°. La distancia entre el máximo y el mínimo es de 1100 m. para el perfil interpolado (1167 m. para el perfil observado) y la diferencia de intensidad observada es de 2250 nT o de 2695 nT para la intensidad inferida por interpolación. Sobre su dirección azimutal se trazó el perfil de estudio Am-Am', con longitud de 3250 m. Además tiene un strike azimutal de 315°.

En la figura 4.31 se observa el mapa de la reducción al polo de la anomalía III, aquí puede apreciarse como la anomalía dipolar se reduce a un monopolo, el cual nos permite ubicar el cuerpo anómalo mediante la inferencia de sus coordenadas geográficas. El posible centro del cuerpo, se localiza aproximadamente a los 2200 m del origen del perfil Am-Am'.

El plano de la segunda derivada puede observarse en la figura 4.32. Aquí se aprecia la delimitación de un cuerpo profundo que tiene sobrepuestos, un conjunto de cuerpos pequeños y someros.

La continuación hacia arriba se hizo para una y dos unidades, es decir para 250 y 500 m. de altura. En las dos continuaciones se observa como la forma de la anomalía se mantiene, indicándonos que posiblemente se trate de un cuerpo grande con una profundidad mayor de los 750 m. (ver fig. 4.33 y 4.34).

Respecto a la continuación hacia abajo, se realizó para una y .4 unidades (es decir para 250 y 100 m.). En la primera (ver fig. 4.4.35) se puede ver como la forma de la anomalía se mantiene sin cambio, y para la segunda (ver fig. 4.36) es notable observar el resalte de las frecuencias altas pero sin que se distorsione notablemente la anomalía observada, indicándonos con ésto, la posible proyección hacia la superficie del cuerpo profundo y la presencia de otro cuerpo pequeño, sustentado por el resalte de un efecto dipolar de tendencia NE.

Mediante la información proporcionada por el procesamiento digital, el estudio paleomagnético (del capítulo siguiente), las propiedades físicas, la forma y la orientación de la anomalía observada, han dado pauta para estimar los parámetros geométricos y magnéticos, del cuerpo anómalo fuente. Nuevamente, la anomalía puede modelarse mediante un cuerpo prismático o tabular, que bien puede corresponder con la presencia de un dique (como en los casos anteriores). Dicho cuerpo tiene una magnetización inducida con intensidad = 558 mA/m, declinación = 7.5°, inclinación = 44.642° y una magnetización remanente de intensidad = 14792 mA/m, declinación = 80.25° e inclinación = 20 15°. En la gráfica 4.37 se puede apreciar el perfil de la anomalía observada; la calculada mediante la intensidad total ($J_i + J_r$) y las anomalías provocadas por cada una de las componentes. En la gráfica 4.38 se puede apreciar el cuerpo anómalo propuesto; con una profundidad de 300 m, una longitud de 500 m, un ancho de 80 m y una inclinación de 103°.

V.- RESULTADOS Y DISCUSION.

V.1.- Presentación de los sitios.

El análisis de las direcciones (MRN) se efectuaron sobre redes estereográficas de igual área, en las que se graficó la declinación (D) e inclinación (I) de todos los especímenes de cada sitio. Representándose con " + " las inclinaciones positivas y con una "o" las negativas. Aclarando que las redes de igual área, sólo se utilizaron para reportar las direcciones de los especímenes, puesto que los fragmentos se utilizaron con el criterio específico de reportar las propiedades físicas.

La forma de interpretación en las direcciones, se hace en base al grado de agrupamiento, lo cual sugiere una mayor o menor estabilidad de la MRN. Por ejemplo, si las direcciones están agrupadas y presentan valores grandes del parámetro "k" y pequeños de α_{95} , nos indica que nuestra MRN está constituida por MRT; en el caso contrario, la MRN estará afectada por magnetizaciones remanentes secundarias.

Respecto a la desmagnetización térmica, se presentan los resultados de los especímenes piloto, mediante gráficas de intensidades normalizadas (J_i/J_o) vs. temperatura, siendo J_i la intensidad residual después de cada fase de calentamiento y J_o la intensidad de la MRN sin desmagnetizar. Como fue aclarado en el subcapítulo II.4, por razones técnicas sólo se aplicaron dos y tres pesos en este proceso (320° y 440° C para los pilotes de la zona anómala 12-9-7 y 230° , 320° y 440° C para la zona 12-9-3). Si bien los pasos son mínimos, éstos permiten inferir a muy grandes rasgos los constituyentes magnéticos del espécimen, basado en el criterio de la temperatura de Curie para cada mineral.

La desmagnetización por campos alternos decrecientes igualmente se aplicó a especímenes pilotes con pasos de 5, 10, 17.5, 25, 35, 45, 65, 80 y 95 mT; en cada paso los especímenes fueron sometidos tres veces a la acción del campo pero en posiciones perpendiculares y diferentes entre sí. Se presentan los resultados en gráficas normalizadas J_i/J_o vs. campo desmagnetizante en mT.

La magnetización isoterma (MRI) también se realizó sobre especímenes piloto y se utilizaron doce o catorce pasos de 5, 10, 20, 40, 60, 100, 150, 200, 300, (400), 500, 650, (800) y 830 mT. Los resultados se presentan y se discuten mediante gráficas de adquisición isoterma normalizadas (J_i/J_o) vs. campo magnetizante en mT.

Respecto a los fragmentos, su mineralogía magnética fue deducida a partir de procesos de desmagnetización térmica y por CA, así como la aplicación de MRI. Se presentan además gráficos de MRN vs. k, MRN vs. ρ , Q vs. k, MRN vs. Q y MRN y ρ vs. k, que se discuten en base a las propiedades magnéticas de las rocas.

Para el presente estudio paleomagnético, se orientaron muestras de núcleos, de un total de siete sitios. Los sitios en donde se colectaron las muestras pertenecen a diferentes unidades de rocas (véase la figura 5.1). A continuación se presenta la descripción de cada uno de ellos.

V.1.1.- Sitio I.

Se encuentra localizado en lo que denominamos la zona anómala 12-9-7. El muestreo se hizo sobre un afloramiento que exhibía roca fresca y que aparentemente no presentaba indicios de movimientos estructurales; se trata de una roca ígnea extrusiva (para algunos detalles geológicos de campo véase la tabla 2.2). Para la orientación de las muestras se utilizó el orientador solar debido a que la brújula magnética no funcionó.

En la gráfica 5.3 se observa una distribución bastante dispersa de los especímenes (véase en la tabla 5.1 los parámetros estadísticos de α_{95} y k). El sitio presenta una polaridad reversa. La intensidad de la MRN, bastante grande con dirección SE (tabla 5.1, 5.2), genera que el factor "Q" sea también grande y por lo tanto se remarque la importancia de considerar la MRN en la interpretación magnetométrica cuantitativa (véase la tabla 5.2).

Para el análisis de la estabilidad magnética y la identificación de los portadores magnéticos, se eligieron una serie de especímenes pilotos, cuyo resultado fue: en el proceso de desmagnetización térmica se concluye que el espectro continuo de los cuatro especímenes pilotos, indican que la MRN es portada por minerales de la serie Titanomagnetitas (TM) en base a que las Temperaturas Desmagnetizantes Medias (TDM) fueron menores de 470°C (véase tabla 5.2) y con Temperaturas Curie (T_c), posiblemente de 460° a 530° C (con estas T_c tal vez se trate de Magnetita, véase la gráfica 5.4. En sus diagramas vectoriales (sólo para los pilotos 1.2 y 1.6) se observa la destrucción de una magnetización remanente secundaria (MRs) a los 320° C y posteriormente presenta prácticamente una sola dirección que posiblemente es la de la MR estable (véase la gráfica 5.5 y 5.6). En el proceso de Desmagnetización por Campos Magnéticos Alternos Decrecientes (DCMAD) se utilizaron tres especímenes pilotos; los espectros de desmagnetización por CA indican la presencia de minerales magnéticos de muy alta coercitividad, con campos destructivos medios (CDM) mayores a los 80 mT que infieren la presencia de minerales magnéticos de dominios sencillos, pertenecientes a la serie Ilmeno-Hematita (IH), posiblemente se trate de hematita. Sin embargo, por los datos obtenidos por el proceso de Magnetización Remanente Isotermal (MRI) para el estudio del espectro de coercitividad, se observó que su Magnetización de Saturación (M_s) se alcanzó para campos mayores de 500 mT (véase las gráficas 5.8, 5.9 y 5.10). De la forma de su espectro de coercitividad, el valor de la M_s y sus T_c , se puede concluir que coexisten la presencia de dos minerales magnéticos de la serie TM e IH (posiblemente magnetita y hematita).

V.1.2.- Sitio II.

Este sitio pertenece a la zona anómala 12-9-7. El muestreo se realizó sobre rocas ígneas extrusivas,

cuyo afloramiento era fresco y sin rasgos de algun movimiento notable o aflamiento del mismo (para algunos pormenores geológicos de campo véase la tabla 2.2).

En la gráfica 5.11 se puede observar que los especímenes presentan una distribución dispersa (véase los parámetros estadísticos de α_{95} y k) en términos de su MRN, con una polaridad normal y una dirección media hacia el Este (véase las tablas 5.1 y 5.2). El factor "Q" resulta ser el más alto de todos los sitios (véase la tabla 5.2), nuevamente se recalca la importancia de considerar la MRN para la interpretación magnetométrica cuantitativa.

Eligiendo una serie de pilotos para la desmagnetización térmica (cuatro pilotos), se observó que sus espectros continuos (ver la gráfica 5.12) son típicos de minerales magnéticos de coercitividad alta (aplicando una temperatura de 440° C, su magnetización residual es de aproximadamente 65 al 120% el valor inicial). Esto conlleva a pensar, que los portadores magnéticos son de la serie IH, concretamente hematitas. En los diagramas de Zijderveld se observan cambios pequeños de dirección debido a su coercitividad alta (véase la gráfica 5.13 y 5.14); en el piloto DTN2-5 (gráfica 5.14), posiblemente se destruye una MRs.

Lo que respecta a la DCMAD, se corrobora la coercitividad alta del sitio; obteniéndose CDM para las muestras piloto de aproximadamente 87 mT, que permiten corroborar la presencia de Hematitas (véase la gráfica 5.15). Sin embargo en el estudio del espectro de coercitividad (MRI), por la forma de la curva de adquisición de la magnetización isoterma, se infiere la presencia de titanomagnetitas (seguramente magnetita) con dominio de las hematitas. En el espectro de coercitividad del piloto ISOTNII.2 (ver gráfica normalizada 5.16) se observa la coexistencia de estos minerales, en cambio en el espectro del piloto ISOTNII.4 (ver gráfica normalizada 5.17) se observa claramente el dominio de la hematita.

En base a lo anterior, se puede concluir, que debido a la coercitividad alta y a los cambios pequeños de dirección durante el proceso de desmagnetización, las rocas presentan un grado alto de alteración, que bien pudiera deberse a una oxidación de bajo grado de la magnetita que dió como resultado, éstos ejemplos típicos de hematita.

V.1.3.- Sitio III.

El sitio pertenece a la zona anómala 12-9-7. El afloramiento muestreado era fresco y sin complejidades estructurales visibles; se trata de una roca ígnea extrusiva. Al igual que para el sitio anterior, la brújula magnética sí funcionó. Para algunos detalles geológicos de campo, véase la tabla 2.2.

En la gráfica 5.18 se observa una distribución aceptable (véase los parámetros estadísticos de α_{95} y k) con una intensidad remanente baja (la más baja de todas) y una dirección media aproximadamente al NE (véase la tabla 5.1). Presenta una polaridad reversa, igual que la primera. El factor de Koenigsberger "Q" es el más bajo de todos los sitios (véase la tabla 5.2).

En el proceso de desmagnetización térmica, se eligieron cuatro especímenes pilotos cuyos espectros continuos de desmagnetización, indican la presencia de portadores magnéticos pertenecientes a la serie de las titanomagnetitas. Dichos minerales presentan TDM que van desde 340 a 435° C y temperaturas de Curie de 440 a 530° C, lo que indica la presencia de magnetita (véase la gráfica 5.19). Del análisis de los diagramas de Zijdeveld, para solo dos de los cuatro especímenes pilotos, se observó la destrucción de una MRs a los 230° C. Es interesante resaltar que de los dos especímenes pilotos (DTN3-3 y DTN3-7), el primero posiblemente proporcione la dirección de la MR estable después de destruida la MRs (véase la gráfica 5.20), sin embargo el segundo parece haber sufrido algún proceso de oxidación que ha hecho que su coercitividad aumente y por lo tanto, la dirección de su MR estable no se pueda establecer (gráfica 5.21).

Para este sitio no se realizó el proceso de DCMAD, pero sí se realizó un análisis del espectro de coercitividad, mediante la MRI. En la realización del proceso, se contó con tres especímenes pilotos, los cuales presentaron una curva de adquisición, que lleva a plantear, la existencia de dos portadores magnéticos de la serie de las TM e IH, de manera concreta pudiera tratarse de magnetita y hematita respectivamente. Haciendo la aclaración de que se trataría de titanomagnetitas pobres en hematita (véase las gráficas 5.22, 5.23 y 5.24).

V.1.4.- Sitio IV.

La elección del sitio, se hizo bajo el mismo criterio de los anteriores. Nuevamente la orientación de los núcleos se llevó al cabo, con una brújula magnética; por lo incómodo del lugar sólo se pudieron extraer tres núcleos, de los cuales sólo se obtuvieron tres especímenes.

En la gráfica 5.25 puede observarse la distribución direccional con baja dispersión. La intensidad de la MRn es baja, con una dirección media aproximadamente hacia el Este (véase la tabla 5.1) y un factor "Q" menor que la unidad (véase la tabla 5.2).

Para el proceso de desmagnetización térmica se tomaron dos pilotos (IV.1 y IV.3), cuyos espectros continuos de desmagnetización proporcionaron TDM mayores de 450° C y posiblemente con temperaturas de Curie superiores a 550° C y menores de 630°C, que pudieran corresponder a minerales magnéticos de la serie de las titanomagnetitas en proceso de oxidación (véase la gráfica 5.26). El análisis de las direcciones por medio de diagramas de Zijdeveld, de la desmagnetización térmica, implican que posiblemente sea ésta la dirección principal; en la medida de que no se distingue alguna destrucción de MRs (véase las gráficas 5.27 y 5.28). Esto permite inferir que la coercitividad es intermedia así como su estabilidad. Esto indica, la presencia de minerales magnéticos de transición, posiblemente de magnetita a hematita.

El proceso de DCMAD se realizó con un sólo espécimen piloto. Este presentó un espectro continuo de desmagnetización que implica la presencia de un portador magnético con CD:1 mayores de 45 mT, que posiblemente pudiera ser un mineral de transición de magnetita a hematita (véase la gráfica 5.29). El análisis

del espectro de coercitividad, mediante el método de MRI (véase la gráfica 5.30), precisa las ideas discutidas anteriormente y permiten reforzar la idea inicial, de la existencia de dos portadores magnéticos que pudieran ser: minerales de magnetita y hematita con dominio de los primeros.

V.1.5.- Sitio V - VI.

Con el mismo criterio de selección de la zona, de los anteriores, sólo se pudieron obtener tres núcleos, dos para el sitio V y solamente uno para el sitio VI. Esto se debió a la falta de un buen afloramiento, pues el mismo estaba un tanto inaccesible y por lo tanto bastante incómodo, a la vez que el sitio del agua se encontraba muy retirado. Por esta razón, se unifican los sitios. Cabe mencionar que en estos sitios la brújula magnética no funcionó, por lo que se utilizó el orientador solar.

Si sólo se considera los especímenes del sitio V, estos tendrían una distribución alta, como se puede apreciar en la gráfica 5.31 en su parte superior (así como en sus parámetros estadísticos de α , σ , y k de la tabla 5.1); sin embargo es importante notar que un sitio con sólo dos especímenes es erróneo trabajar, pero para nuestros fines es de utilidad su interpretación. Respecto al único espécimen del sitio VI, no se puede decir algo, respecto a su distribución. En cuanto a sus intensidades remanentes, los tres presentan valores altos, por lo tanto sus factores de "Q" también lo son. Con esto, nuevamente se vuelve a resaltar la importancia de considerar la MRN en la interpretación magnetométrica cuantitativa (véase la tabla 5.2).

En el proceso de la desmagnetización térmica, es interesante notar un comportamiento casi similar entre los espectros de los tres especímenes, sin embargo es notable la separación del espectro del espécimen VI.1 (véase la gráfica 5.32). Esto proporciona elementos, para plantear en una alteración notable de la roca del sitio VI (sin excluir la propia del sitio V), tal vez, una oxidación de grado bajo. Extrapolando los espectros, se puede inferir una temperatura de Curie grande, para los tres especímenes (posiblemente mayor de 650° C), así como una coercitividad alta, que plantea la presencia de portadores magnéticos de la familia de las IH, concretamente hematitas. Esta disertación, se sustenta en el análisis de sus direcciones residuales, por diagramas de Zijdeveld (véase las gráficas 5.33 y 5.34). En los cuales se nota perfectamente que los especímenes, presentan cambios pequeños en la dirección y por ende una coercitividad alta, permitiendo corroborar que las muestras están alteradas en grado alto, lo cual es típico de las hematitas.

Mediante el proceso de DCMD pueden sustentarse, las aseveraciones arriba mencionadas. Para este proceso se escogieron dos especímenes "piloto", uno de cada sitio. En el espectro de desmagnetización del espécimen "piloto" V.2 (véase la gráfica normalizada 5.35), se observa una coercitividad alta y un valor de CDM superior a los 80 mT. Para el sitio VI, el espécimen "piloto" presenta un CDM de 62 mT (véase la gráfica 5.36) y por lo tanto implica la presencia de un portador magnético de gran estabilidad. Esta información aunada con la obtenida en el análisis del espectro de coercitividades por medio de la MRI, para los dos especímenes (ver gráficas 5.37 y 5.38), permiten concluir que para el sitio V se tiene la presencia de titanomagnetitas y hematitas (en mínima proporción) y para el sitio VI, la presencia de hematitas.

V.1.6.- Sitio 12-9-3.

Este es el único sitio que pertenece a la zona anómala 12-9-3. El muestreo se realizó a orillas del río "Lomillo", del cual se extrajeron diez núcleos cortos, que proporcionaron diez especímenes. La roca presentaba cierto grado de interperismo. Al igual que en los sitios anteriores la brújula magnética no funciona, por lo que la orientación se realizó con "brújula" solar.

En la gráfica 5.39 se observa la dispersión que tiene el sitio, respecto a las direcciones de las MRN (véase los parámetros estadísticos de α_{95} y k en la tabla 5.1). Dicha dispersión es similar a la obtenida en el sitio I, sin embargo, es interesante observar la tendencia a agruparse en tres conjuntos de especímenes, ubicados en el primero, tercero y cuarto cuadrante de la red estereográfica. Su dirección media es casi coincidente con una orientación SE (ver la tabla 5.1). La intensidad media de la MRN es baja en términos de los sitios anteriores y su factor "Q" es superior a la unidad (véase la tabla 5.2), resaltando nuevamente la importancia de la MRN en la interpretación magnetométrica cuantitativa.

El proceso de desmagnetización térmica se realizó con cinco especímenes pilotos, los cuales tuvieron un espectro similar, con posibles TDM de 450° a 500° C y posibles temperaturas de Curie de 470° a 540° C (véase la gráfica 5.40). Estos parámetros inferidos, permiten en un primer momento, inferir la presencia de portadores magnéticos de composición variable y predominancia de minerales magnéticos de la serie de las TM, específicamente magnetita. Se analizaron las direcciones de la magnetización residual de tres de los cinco pilotos, escogiéndose uno de cada pseudogrupo (DTN93-10, DTN93-2 y DTN93-8 respectivamente), utilizando diagramas de Zijderveld (véase las gráficas 5.41, 5.42 y 5.43). Los resultados muestran la posible destrucción de dos Ms pequeñas a los 230° y 320° C, las que posteriormente presentarán una sola dirección que posiblemente sea la dirección principal.

Respecto a la DCMAD, se trabajaron tres especímenes pilotos, que presentaron espectros muy parecidos, con CDM de 28 a 38 mT, lo que nos indica que los portadores magnéticos principales son de la familia de las TM, específicamente magnetita (véase la gráfica 5.44). Además el análisis del espectro de coercitividad mediante las curvas de adquisición de la MRI, implican y corroboran la presencia de la magnetita, así como la existencia de un segundo mineral que posiblemente sea hematita en cantidades menores (véase las gráficas normalizadas 5.45, 5.46 y 5.47).

V.2.- Propiedades físicas para núcleos.

Como parte final del análisis de los especímenes, se presenta a continuación una breve discusión en torno a unos gráficos de propiedades físicas; que si bien es cierto, ya se habían discutido con anterioridad de manera particular, ahora se plantea discutirlos en conjunto.

Es sabido que los resultados de las propiedades físicas son auxiliares excelentes para el estudio

cuantitativo de algunas anomalías de índole geofísico (ejemplo, el capítulo IV del presente trabajo) y para el control de la interpretación de datos (dirección o intensidad de la MRN y k). Sin embargo estos resultados proporcionan información sobre los efectos de varios procesos geológicos que actúan durante y después de la génesis de las rocas. Sin pretender realizar una disertación exhaustiva sobre propiedades físicas, se analizarán cuatro gráficos.

En la gráfica MRN vs. k (ver gráfica 5.48) se tienen unas variaciones notables en los valores de intensidad de la MRN, que van desde 31.48 a 133967.3 mA/m y en la susceptibilidad, que van desde 131.94 a 6157.52×10^{-5} SI. Dichas variaciones (véase la gráfica 5.48) se dan dentro de un mismo sitio, y entre estos, en una litología específica.

Por ejemplo, para los sitios I, II, IV, V-VI y 9-3 se tienen valores altos, tanto en la intensidad de la MRN como en la susceptibilidad. Esto puede explicarse por las variaciones en el contenido de volumen de (titano) magnetita. En cambio para el sitio III, su intensidad baja y variación amplia de la susceptibilidad, es un posible indicativo de la medición de diferentes tipos de rocas asociadas con procesos de oxidación alta; y por lo tanto sus valores bajos observados se deben al incremento de fases no magnéticas, generadas a expensas de titanomagnetita inicial, sometida a oxidación de temperatura alta.

En el gráfico MRN vs. Q (gráfica 5.49) y el Q vs. k (gráfica 5.50), los valores del factor de Koonigsberger, también presentan variaciones grandes (de 0.583 a 193) las cuales posiblemente sean originadas por diferencias en el tamaño del grano y la composición química de los portadores magnéticos, además de una variación en las cantidades de los granos magnéticos. Esta variación amplia en el rango, también se justifica porque las rocas volcánicas presentan tamaños de granos y mineralogía muy variable, a diferencia de las intrusivas. La relación lineal observada en esta gráfica (5.49), corrobora la discusión, en términos de que esta respuesta, se debe a una gran variación en los tamaños de los granos magnéticos, puesto que la susceptibilidad guarda una relación directamente proporcional con el tamaño del grano.

Respecto al gráfico MRN vs. Densidad, no hay alguna relación notable que pueda inferirse, debido a una distribución totalmente dispersa (véase la gráfica 5.51); permitiendo concluir, que en las rocas ígneas extrusivas los procesos regionales secundarios parecen tener un efecto menor, sobre la densidad.

V.3.- Fragmentos.- estudio paleomagnético y propiedades físicas.

Como se mencionó en el capítulo I, por cuestiones técnicas y problemas de campo, el muestreo paleomagnético fue mínimo; razón para apoyarse en el presente estudio, de fragmentos de nueve sitios diferentes, provenientes de muestras de bloque y de mano, de la zona anómala 12-9-7. Cuyo único objetivo, fue tener un control más confiable de los parámetros magnéticos esenciales (intensidad de la MRN, susceptibilidad e identificación de los portadores magnéticos). De las muestras pertenecientes a cada uno de los nueve sitios, se extrajeron cuatro fragmentos, para obtener un total de 36 fragmentos.

Respecto a la MRN, sólo se calculó su intensidad, excluyendo el análisis de su dirección por razones

obvias. Por lo tanto no se presenta red estereográfica. La variación de la intensidad va desde .325 a 34.818 mA/m, con un valor medio de 12.3375 mA/m (valor parecido al considerado para la interpretación magnetométrica cuantitativa); una susceptibilidad media de 2800.15×10^{-5} SI (también parecido al valor utilizado para la modelación); por último, los fragmentos presentan un valor medio del coeficiente "Q" de 21.55, que vuelve a resaltar, la necesidad de considerar la MRN en el análisis magnetométrico cuantitativo.

En el estudio de la estabilidad, sólo se aplicó la DCMAD. Se eligió un fragmento piloto para cada sitio. Del análisis del espectro de cada piloto, se infiere el portador o portadores magnéticos. Para el sitio I, se tiene aproximadamente CDM menores de 650 Oe, infiriéndose un portador magnético de coercitividad baja, que pudiera ser magnetita (véase la gráfica normalizada 5.52). Para el sitio II, se tiene CDM de 50 mT y por la forma de su espectro, se infiere un portador magnético de coercitividad baja, con posibilidades de ser magnetita, pues se tiene el 12% de magnetización residual al aplicarlo un campo menor de 100 mT (véase la gráfica 5.53). El mismo criterio puede utilizarse para el fragmento del sitio VII (ver gráfica 5.54). Para el sitio VIII, se tiene un portador magnético de coercitividad alta que pudiera tratarse de hematita (véase la gráfica 5.55). Para el sitio IX, X y X' se tienen casi los mismos comportamientos que el anterior (véase las gráficas 5.56, 5.57 y 5.58). Para el sitio XI, se tiene un espectro complejo que nos indica la presencia de mínimamente dos portadores magnéticos, de coercitividad baja y alta, posiblemente magnetita y cantidades menores de hematita respectivamente (véase la gráfica 5.59).

En los análisis de los espectros de coercitividades, mediante el proceso de la MRI, se obtuvieron una serie de espectros que permiten precisar los portadores magnéticos de las rocas muestreadas. En la gráfica 5.60, perteneciente al sitio I, se observa, la presencia de dos componentes magnéticos, posiblemente magnetita y hematita en menor cantidad. Para el sitio II, su curva espectral es más clara y nos determina la presencia de un sólo portador magnético, que bien puede ser magnetita (véase la gráfica 5.61). El espectro del sitio VII, indica la presencia de dos portadores magnéticos, magnetita y hematita. Para el sitio VIII, la forma del espectro, es característico de las hematitas (véase la gráfica 5.62). No así el sitio IX, que tiene un comportamiento de magnetita, con posibles indicios de hematita (véase la gráfica 5.63). El espectro para el sitio X y X', tienen comportamientos de coercitividades altas; que implican la presencia de hematita (véase los gráficos 5.64 y 5.65). Lo mismo para el sitio XI (vea gráfica 5.66). Para el sitio 600, su espectro tiene un comportamiento típico de las magnetitas, con cantidades mínimas de hematita (vea la gráfica 5.67).

Lo que respecta a las gráficas de propiedades petrofísicas, se consideran todos los fragmentos. Al igual que para los núcleos, se analizaran cuatro gráficas.

Como se mencionó anteriormente, el intervalo de variación de la MRN es grande, no así para la susceptibilidad (véase la gráfica 5.68), que se encuentra restringida a un intervalo de variación mediana. Esto conlleva a concluir que la variabilidad de la susceptibilidad inicial de una roca ígnea intrusiva puede estar controlada principalmente por la abundancia, composición y tamaño del grano del grano de los óxidos de Fe-

Ti, pero también por oxidación de temperatura baja, así como hidrotermalismo y reacciones metamórficas. Además la variación de la susceptibilidad de los fragmentos, demuestra como los portadores magnéticos se distribuyen heterogéneamente, implicando con esto una anisotropía magnética grande, para este tipo de roca. Esto se conjuga con la diversidad de litologías muestreadas, que ocasionan una variación grande en la MRN (ya afectada por los diversos procesos de oxidación que haya sufrido).

En la gráfica Q vs. k (véase gráfica 5.69), los valores de los coeficientes de Königsberger, presentan una disminución conforme aumenta la k, lo cual puede explicarse en términos de una posible reducción del tamaño de grano efectivo, durante un proceso de oxidación; dando como resultado magnetizaciones remanentes y coercilvidades altas (véase los espectros de la DCMAD).

En la gráfica MRN vs. Q (véase la gráfica 5.70), también se aprecian variaciones grandes de "Q", que representan diferencias en el tamaño y la composición química de los portadores magnéticos, así como una variación en las cantidades de los granos magnéticos (las variaciones de "Q" van de 0.47 a 70). Esto nos recuerda, que las rocas ígneas extrusivas (RIE) presentan una amplia variación en el tamaño del grano y la mineralogía, así como explican, que la relación lineal observada en éste gráfico, se debe a la relación directamente proporcional que guarda k y el tamaño del grano.

Por último, en el gráfico MRN vs. Densidad (véase gráfica 5.71) presenta un comportamiento similar al de su gráfica homóloga para núcleos, permitiendo nuevamente concluir, que las RIE presentan una respuesta menor en relación a su densidad, a los procesos regionales secundarios.

CONCLUSIONES.

De los desarrollos de los estudios: paleomagnético y de propiedades físicas, realizados en muestras de rocas volcánicas pertenecientes a una área de estudio que va desde los 17° 30' a los 17° 34' de latitud norte y de los 100° 23' a los 100° 29' de longitud oeste; localizada en el estado de Guerrero. Y en donde con la ayuda de los resultados, de los estudios anteriores, se interpretaron cuantitativamente cuatro anomalías aeromagnéticas de la misma área; se llega a las siguientes conclusiones:

- El mapa aeromagnético del área, presenta un conjunto de anomalías dipolares de intensidad alta, con una tendencia general NE-SW

- Las anomalías interpretadas presentan carácter dipolar normal. Las amplitudes de sus máximos y mínimos se estimaron mediante un interpolador cúbico.

- Los datos aeromagnéticos de las cuatro anomalías, se procesaron realizando primeramente una discretización cada 250 m sobre la anomalía de interés, obteniendo las siguientes rotículas:

Anomalía I	4 km X 2.5 km
Anomalía II	2.75 km X 2.75 km
Anomalía III	2.75 km X 2.75 km
Anomalía IV	2.75 km X 1.75 km

Luego se procedió a la aplicación de los operadores matemáticos de reducción al polo, para localizar el cuerpo; segunda derivada, para enfatizar las características del cuerpo anómalo; las continuaciones analíticas, ascendentes y descendentes, para enfatizar las frecuencias bajas y altas respectivamente.

- La anomalía I, se localiza en los 17° 31' 29"-17° 33' de latitud norte y 100° 27' 21"-100° 29' 20" de longitud oeste. Tiene un área de 10 km², una diferencia de intensidad magnética de máximo a mínimo de 2748 nT, con una orientación azimutal de 90° y un "strike" N-S. El modelo geofísico planteado se realizó sobre un perfil paralelo a su orientación azimutal, utilizando "Magpoly" y los resultados de los estudios de propiedades físicas y paleomagnetismo, el mejor ajuste se logra mediante un cuerpo prismático rectangular, tipo dique, con profundidad de 260 m, un ancho de 60 m, un largo de 800 m y una inclinación de 132°. La susceptibilidad $k = .025$ SI; la J_r media del área = 14972 mA/m, $D = 80.25^\circ$ e $I = 20.15^\circ$; la $J_l = 678.5$ mA/m, $D = 7.5^\circ$ e $I = 44.642^\circ$.

- La anomalía II, se localiza a los 17° 32' 26"-17° 34' de latitud norte y 100° 23'-100° 24' 33" de longitud oeste. Cubre un área de 9 km²; tiene una diferencia de intensidad magnética de 1473 nT, una orientación azimutal de 54° y un "strike" de tendencia NNW-SSE. El modelo geofísico propuesto, es un cuerpo prismático rectangular, tipo dique; con una profundidad de 360 m, 80 m de ancho, 1000 m de longitud y una inclinación de 134°. La $k = 0.016$ SI, $J_l = 528$ mA/m.

- La anomalía III, se localiza a los $17^{\circ} 33' 47''$ - $17^{\circ} 35' 16''$ de latitud norte y $100^{\circ} 24' 25''$ - $100^{\circ} 26''$ de longitud oeste. Cubre un área de 7.6 km^2 ; tiene una diferencia de intensidad magnética de 2695 nT , una orientación azimutal de 45° y un "strike" de tendencia NW-SE. El modelo geofísico propuesto es un cuerpo prismático rectangular, tipo dique; con una profundidad de 300 m , un ancho de 80 m , una longitud de 500 m y una inclinación de 103° . La $k = .0169 \text{ SI}$ y una $J_I = 558 \text{ mA/m}$.

- La anomalía IV, se localiza a los $17^{\circ} 30' 48''$ - $17^{\circ} 32''$ de latitud norte y $100^{\circ} 28' 30''$ - $100^{\circ} 30''$ de longitud oeste. Cubre un área de 6.5 km^2 ; tiene una diferencia de intensidad magnética de 5528 nT , una orientación azimutal de 20° y un "strike" azimutal de 290° . El modelo geofísico propuesto es un cuerpo prismático rectangular, tipo dique; con una profundidad de 70 m , un ancho de 100 m , una longitud de 330 m y una inclinación de 125° . La $k = .024 \text{ SI}$ y una $J_I = 792 \text{ mA/m}$.

- En promedio, nuestra zona de estudio presenta una MRN de polaridad normal con una magnitud de 14972 mA/m , una declinación de 80.25° y una inclinación de 20.15° (peso a que dos de los siete sitios fueron de polaridad reversa).

- Los sitios I y III presentan polaridad reversa. $MRN(1) = 14345 \text{ mA/m}$, $D = 146.6^{\circ}$ e $I = -24.3^{\circ}$; $MRN(2) = 761 \text{ mA/m}$, $D = 52.1^{\circ}$ e $I = -43.3^{\circ}$.

- Los sitios II, IV, V, VI y 12-9-3 presentan polaridad normal con los siguientes valores. Sitio II, $MRN = 37537 \text{ mA/m}$, $D = 71.3^{\circ}$ e $I = 38.8^{\circ}$; Sitio IV, $MRN = 784 \text{ mA/m}$, $D = 96.2^{\circ}$ e $I = 31.3^{\circ}$; Sitio V, $MRN = 37010 \text{ mA/m}$, $D = 5.2^{\circ}$ e $I = 15.9^{\circ}$; Sitio VI, $MRN = 23980 \text{ mA/m}$, $D = 169.3^{\circ}$ e $I = 14^{\circ}$ y Sitio 12-9-3, $MRN = 1982 \text{ mA/m}$, $D = 129.9^{\circ}$ e $I = 80.7^{\circ}$.

- Se resalta la necesidad de muestrear con un número suficiente de núcleos los sitios propuestos, para tener un control paleomagnético confiable.

- En el presente trabajo se evidencia la importancia que la MRN juega en la interpretación magnetométrica cuantitativa, debido a los valores altos del factor de Königberger (Q).

- La variación y los valores altos de la MRN, así como nos inferen una variabilidad de litologías muestreadas, también nos indica que las RIE estudiadas, están íntimamente relacionadas a un proceso de mineralización.

- Las anomalías magnéticas grandes - como en el presente estudio - tienen su explicación por la presencia de portadores magnéticos pertenecientes a las series titanomagnetitas e ilmenohematitas, asociados con grados diferentes de oxidación. Precizando su mineralogía a partir de los resultados de la desmagnetización térmica, por campos magnéticos alternos decrecientes y por el método isotermal, llevados al cabo en este trabajo, posiblemente se trate de magnetita asociada con diferentes cantidades de hematita.

- Se corrobora la utilidad, que tiene el uso de los operadores matemáticos, para el procesamiento de datos aeromagnetométricos con fines de interpretación cuantitativa, puesto que la aplicación de la reducción al polo, la segunda derivada, las continuaciones analíticas hacia arriba y hacia abajo, fueron importantes para la obtención de los parámetros geométricos, que permitieron modelar, las anomalías seleccionadas..

- Pese a la variabilidad grande de la MRN y la susceptibilidad magnética, el estudio paleomagnético implementado en este tipo de zonas con anomalías grandes, permiten realizar una interpretación magnetométrica más confiable.

- Se prueba que las anomalías magnéticas con orientaciones diferentes a la tendencia N-S, poseen una influencia notable de la MRN.

- Los modelos magnetométricos propuestos, posibles diques mineralizados, tienen una correspondencia con el ambiente geológico regional y observado.

- Las mediciones de propiedades físicas y el paleomagnetismo, permitieron reconocer los portadores magnéticos remanentes y los posibles tamaños de los granos, dominios magnéticos, estados de oxidación e inferir con aproximación los posibles procesos geológicos, a los que estuvieron sometidas las rocas las rocas muestreadas.

ILUSTRACIONES Y GRAFICAS.

Tabla 2.1

Estudio petrográfico de la zona anómala 12-9-7, realizado por el Departamento de Geología de la Empresa Minera "Las Encinas", S.A.

Muestra/Localidad	Textura	Mineralogía Esenciales	Accesorios	Secundarios	Observaciones/Orgen/Clasificn
Zona 12-9-7					
L-1200SW LB-1125SW	Piroclástica- Lapilítica	Vidrio Lífticos Cristales (Pigs-Qz)	(Esquinas- magnética)	Cuarzo	Lífticos tobas volcánicas, andesita basáltica/ Flujo Piroclástico/ Toba Lapilítica-Líftica Dacítica
LB1400SW	Tobácea	Sandino Pigs Cuarzo Cenizas (vidrio fino) Líftico Toba Riolítica	Zircón	Cuarzo Arcillas Limonitas	Flujo Piroclástico/ Toba Riolítica
1200SW/35oSE	Vitroclástica	Cristales -Sandino -Pigs -Cuarzo o -Esquinas		Cuarzo Arcillas	Muy silicificada, esquinas de vidrio devitricados/ Flujo Piroclástico/ Toba Cristalina Riolítica
L400SW,1425SE 1300SW/825SE 1000SW/100SE	Arenítica- Tobácea	Vidrio Pumacita Esquinas Lífticos Andesita- Basáltica Tobas Riolíticas Cristales Cuarzo, Pigs y Sandino		Arcillas	Agilitación Epidota en lífticos de andesita no soldamento/ Flujo Piroclástico/ Toba Vitrea (Riodacítica)

Tabla 2.2

Descripción macroscópica de las muestras recolectadas por sitios

Sitio	No. de muestras	Descripción macroscópica
12-9-3#	10	Roca de color rosa claro. Presenta fragmentos diminutos de otras rocas, inclusive fragmentos pequeños de piedra pómez así como minerales diminutos blancos, posiblemente plagioclasas. Todo esto inmerso en una "matriz" afanítica que es la que le da la coloración mencionada. Se trata de una roca ígnea extrusiva (IE).
I #	8	Roca de color gris a gris oscuro, textura afanítica, presenta de manera esporádica manchas de color ocre. Se trata de una roca ígnea extrusiva (IE), posiblemente una andesita.
III #	8	Roca de color gris y de textura afanítica. Presenta cristales diminutos de plagioclasa. Cuando la roca se fractura presenta manchas de un color negro mate a un tomazol. Nuevamente se trata de una roca IE.
II #	8	Roca de color rosa con una gran cantidad de líficos. Presenta además plagioclasas diminutas y en algunos casos presenta una textura eutáctica. Contiene minerales negros diminutos, posiblemente hematita. Su pseudomatriz es de textura afanítica.
IV #	3	Roca de color gris con una gran cantidad de líficos. Presenta una pseudotextura eutáctica. Además tiene plagioclasas diminutas. La matriz es afanítica. Se trata de una roca IE.
V # -VI # (2 y 1 respectivamente)		Presenta un color rosa y aquí se define una textura eutáctica. Contiene gran cantidad de líficos diminutos y cristales pequeños de plagioclasas. La matriz es afanítica. Se trata de una roca IE, posiblemente un flujo proclástico.

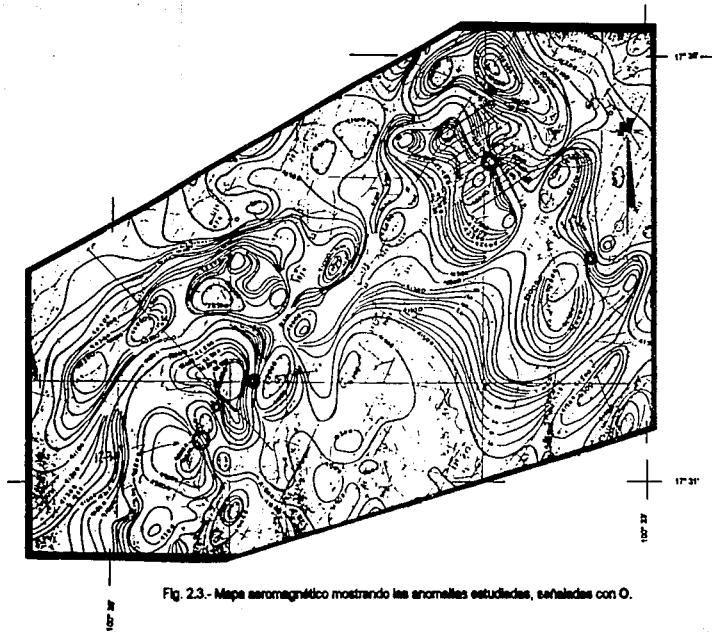



Fig. 23.- Mapa aeromagnético mostrando las anomalías estudiadas, señaladas con O.



Fig. 2.4.- Mapa topográfico, mostrando el área de las anomalías aeromagnéticas modeladas y los sitios de muestreo paleomagnético (en números romanos con mayúsculas se localizan las anomalías y en minúsculas los sitios paleomagnéticos).

Descripción de las áreas geológicas

-  Rocas Volcánicas.
  Rocas Metamórficas.
  Ciudad
-  Rocas Intrusivas

 Área de Estudio, donde se realizó el muestreo Paleomagnético y la interpretación cuantitativa Magnetométrica

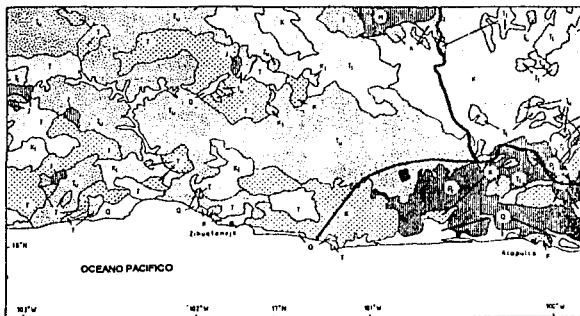


Fig. 2.1.- Mapa geológico regional simplificado de la margen costanera del Sur de Istmo de Tehuacan, 1962), mostrando el área de estudio donde se realizó la investigación paleomagnética y seromagnetométrica. Los símbolos son: G, cuaternario; T, terciario; K, Cretácico; J, Jurásico; M, Mesozoico y P, Paleozoico-Pre cámbrico(?) Subdivisiones 1 y 2 corresponden a inferior y superior, respectivamente

Fig. 2.2.- Columna estratigráfica para el área de estudio
(Tomada de Keesee, 1968)

PERIODO	EPOCAS	AGE	STRATIGRAPHIC AREA	
CENozoico	CUATERNARIO	Q	ALLIQUAN	
	TERCIARIO	PLIOCENO	P3	
		MIOCENO	M3	TEHUACAN MOUNTAINS
		OLIGOCENO	O3	
MESozoico	CRETACICO	C3		
		C2	TEHUACAN MOUNTAINS	
	JURASICO	J3		
		J2		
	TRIASICO	T3	TEHUACAN MOUNTAINS	
		T2		
	PALEozoico	PERMIANO	P3	
			P2	
		CARBONIFERO	C3	
			C2	
PALEozoico	DEVONIANO	D3		
		D2		
	SILURIANO	S3		
		S2		
PALEozoico	ORDOVICIANO	O3		
		O2		
	CAMBRIANO	C3		
		C2		

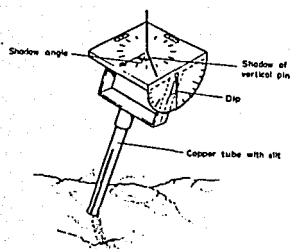


Fig. 2.5.- Esquema del orientador solar de muestras.

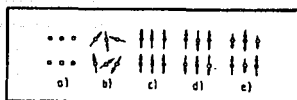


Fig. 3.1.-Clasificación de los momentos magnéticos en la estructura cristalina de minerales: a) Diamagnéticos, b) Paramagnéticos, c) Ferromagnéticos, d) Antiferromagnéticos y e) Ferrimagnéticos.

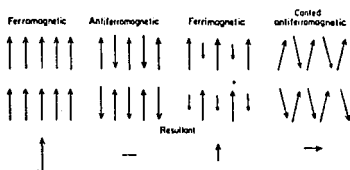


Fig. 3.2.- Clasificación de los materiales Ferromagnéticos.

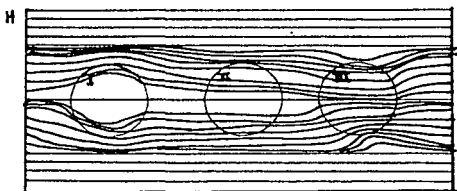


Fig. 3.3.- Representación esquemática de cuerpos magnéticos sometidos a un campo magnético H . I, Cuerpo diamagnético; II, Cuerpo Paramagnético y III, Cuerpo Ferromagnético.

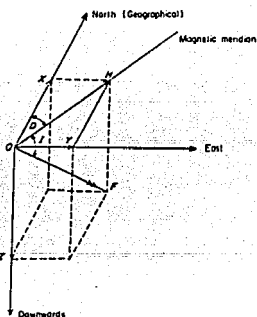


Fig. 3.4.- Esquema tridimensional sobre las componentes principales del CGM.

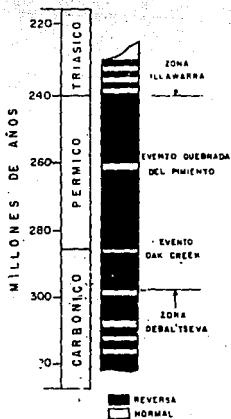
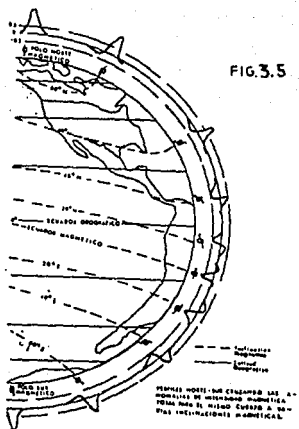


Figura 3.6.- Ejemplo de cambios de polaridad en la escala geocronológica.

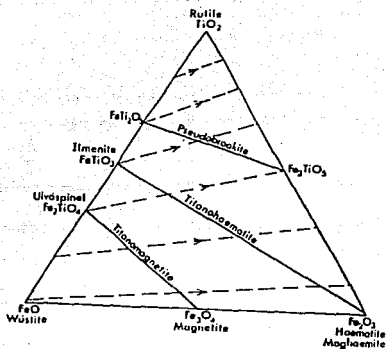
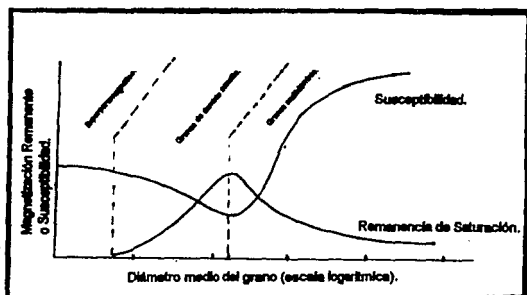


Fig. 3.7.- Diagrama Ternario: FeO-TiO₂-Fe₂O₃.



Gráfica 3.8.- Relación de la MR vs. el diámetro del grano.

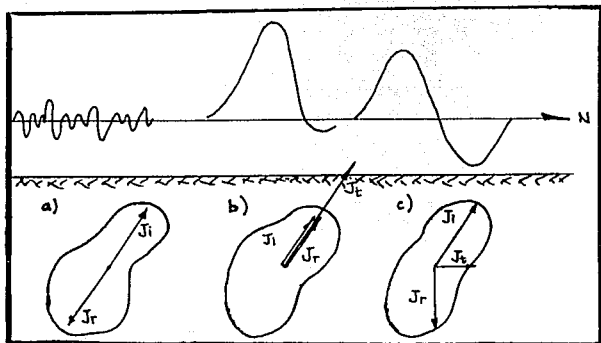


Fig. 4.1.- Importancia de la dirección e intensidad de la MRN.

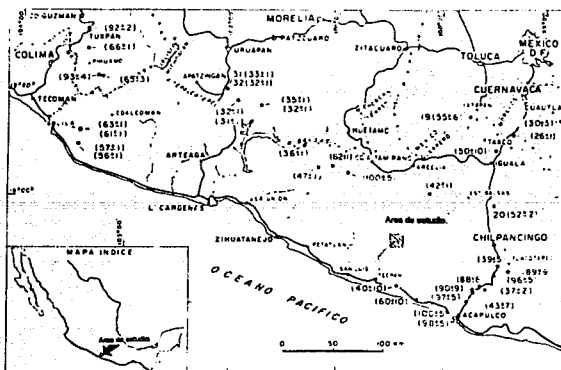


Fig. 4.2.- Mapa que muestra la ubicación del área de estudio paleogeográfico y aerogeográfico, así como algunas elevaciones topográficas de la Sierra Madre del Sur.

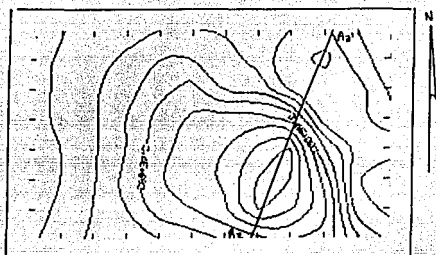


Fig. 4.3.- Anomalia Azul.

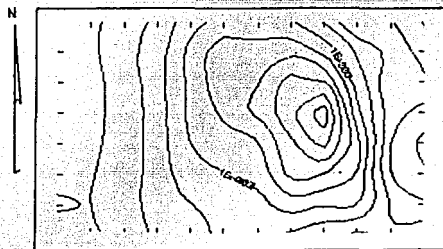


Fig. 4.4.- Reducción al Polo.



Fig. 4.5.- Segunda Derivada.

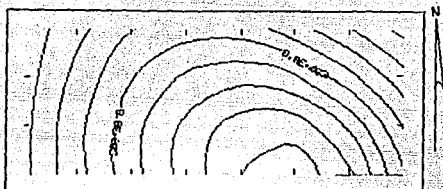


Fig. 4.6.- Continuación hacia arriba (CA) 1 unidad.

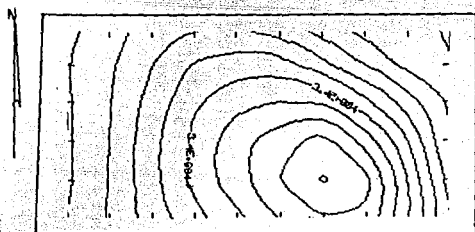


Fig. 4.7.- Cont. hacia abajo (CD) 1 unidad

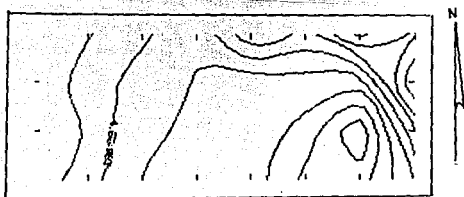
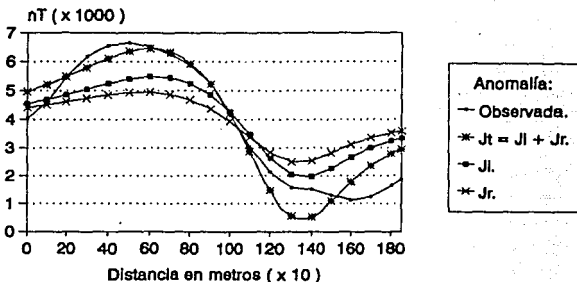


Fig. 4.8.- CD .4 de unidad.

Modelación Magnetométrica Cuantitativa: Anomalia IV.

Perfil Az-Az'. "Las Habilias", Guerrero.

Considerando la Magnetización total, inducida y remanente.

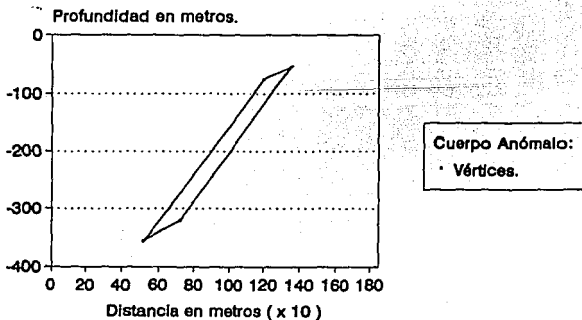


Gráfica No. 4.9

$K = .024 \text{ S.I.}$

$H = 41439 \text{ nT}$, $D = 7.5$, $I = 44.64$, $J_r = 14792$, $D = 80.25$, $I = 20.15$

Cuerpo Anómalo Propuesto.



Gráfica No. 4.10

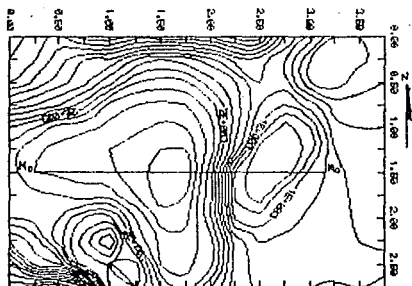


Fig. 4.11.- Anomalia Morado.

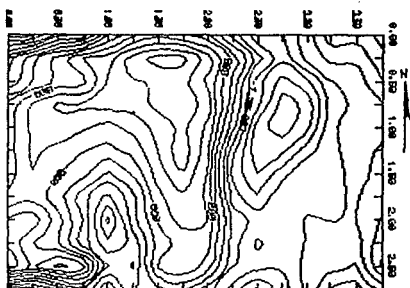


Fig. 4.12.- Reducción al Polo.

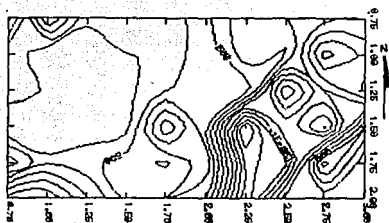


Fig. 4.13.- Segunda Derivada.

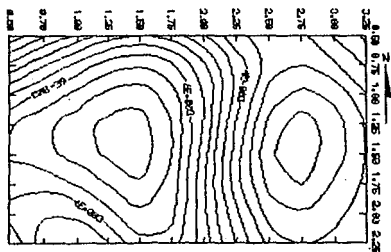


Fig. 4.14.- CA 1 unidades.

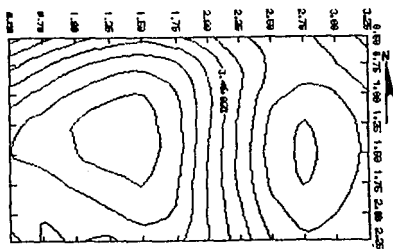


Fig. 4.15.- CA 2 unidades.

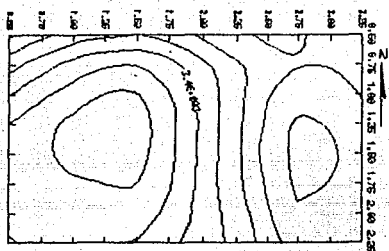


Fig. 4.16.- CA 3 unidades.

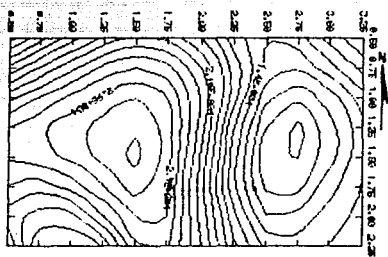


Fig. 4.17.- CD 1 unidad.

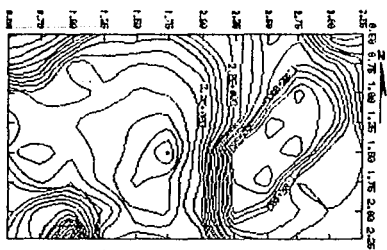
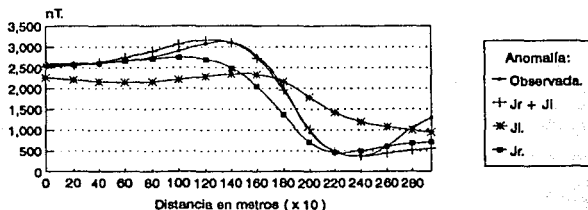


Fig. 4.18.- CD .4 de unidad.

Modelación Magnetométrica Cuantitativa: Anomalía I.

Perfil Mo-Mo'. "Las Habilas", Guerrero.
 Considerando la Magnetización total, Inducida y remanente.

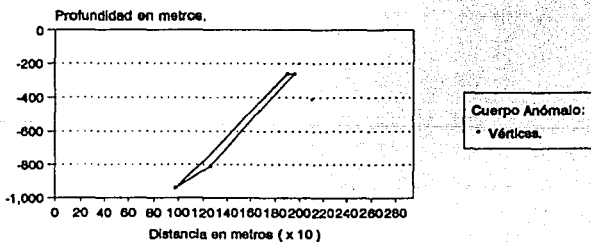


Gráfica No. 4.19

$K = .0205 \text{ S.I.}$

$H = 41439 \text{ nT. } D = 7.5, l = 44.642. J_r = 14972 \text{ mA/m, } D = 80.25, l = 20.15.$

Cuerpo Anómalo Propuesto.



Gráfica No. 4.20

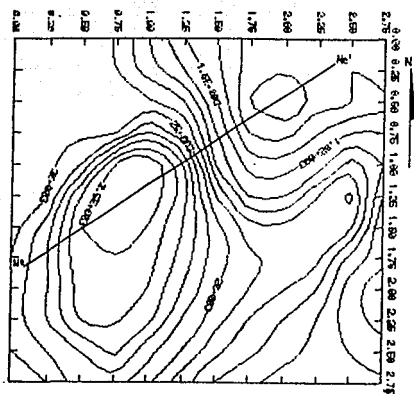


Fig. 4.21.- Anomalia Negro.

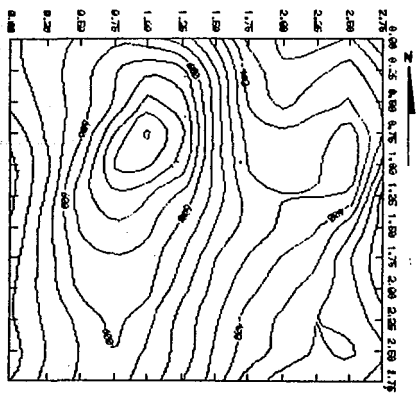


Fig. 4.22.- Reducción al Polo.

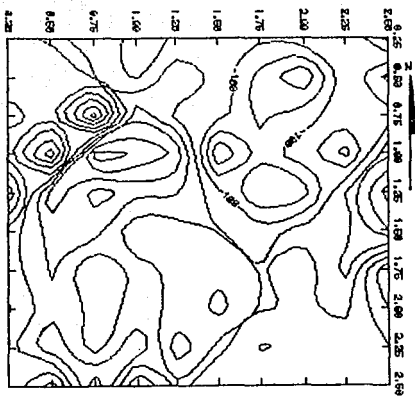


Fig. 4.23.- 2a. Derivada.

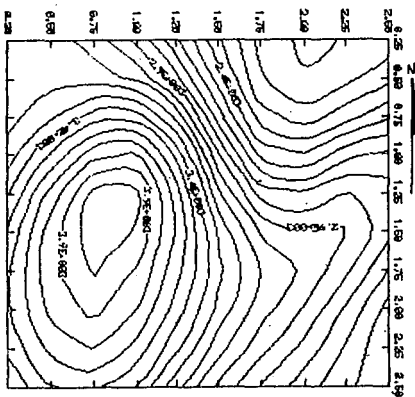


Fig. 4.24.- CA 1 unided.

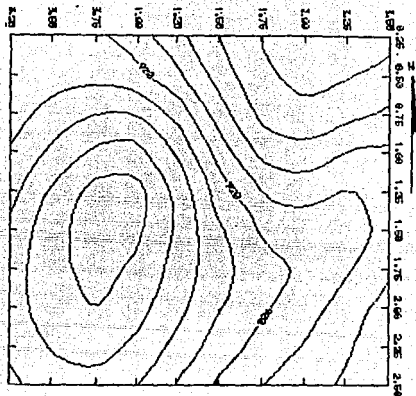


Fig. 4.25.- CA 3 unklides.

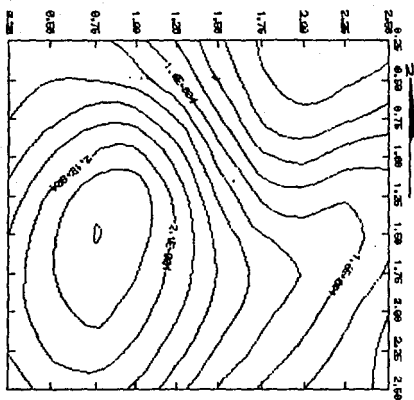


Fig. 4.26.- CD 1 unklid.

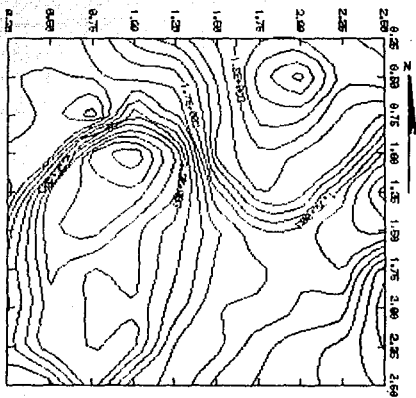
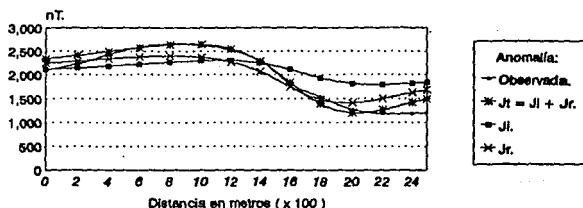


Fig. 4.27 CD 4 de unidad.

Modelación Magnetométrica Cuantitativa: Anomalia II.

Perfil Ne-Ne'. "Las Habillas", Guerrero.

Considerando la Magnetización total, inducida y remanente.

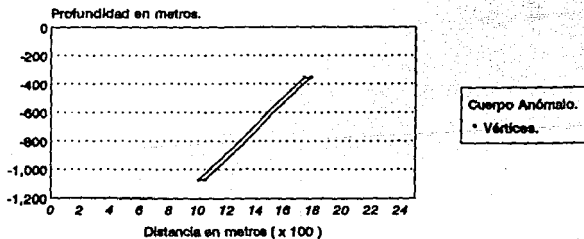


Gráfica No. 4.28

$K = 0.018 \text{ S.I.}$

$H = 41439 \text{ nT}$, $D = 7.5$, $I = 44.64$, $J_r = 14792 \text{ mA/m}$, $D = 80.25$, $I = 20.15$

Cuerpo Anómalo Propuesto.



Gráfica No. 4.29

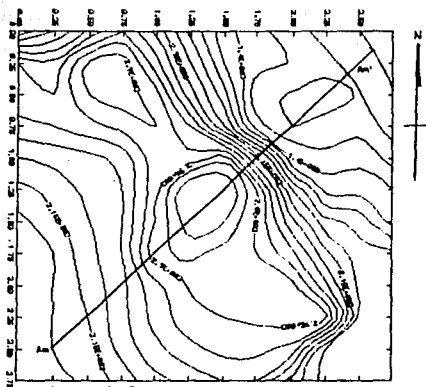


Fig. 4.30 - Anomalia America.

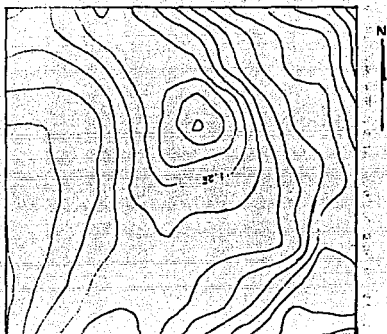


Fig. 4.31.- Reducción al Polo.



Fig. 4.32.- 2a. Derivada.

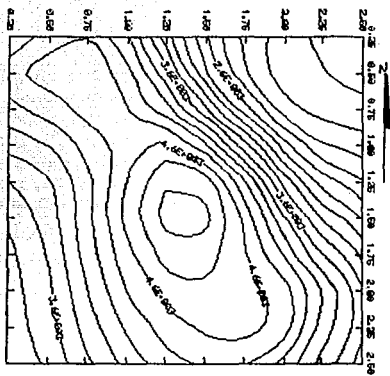


Fig. 4.33.- CA 1 unidad.

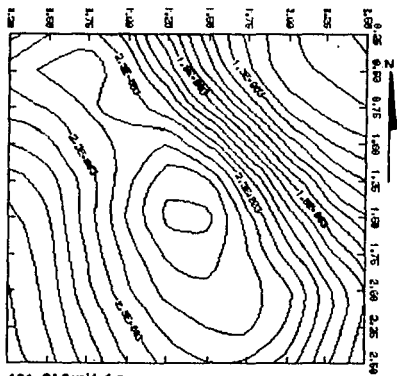


Fig. 4.34.- CA 2 unidades.

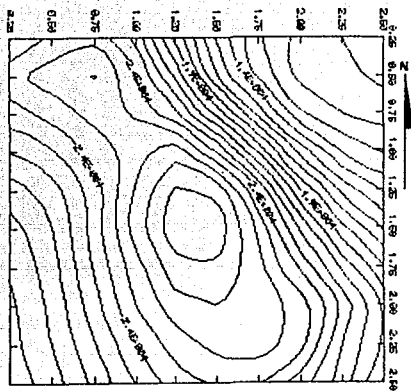


Fig. 4.35.- CD 1 unided.

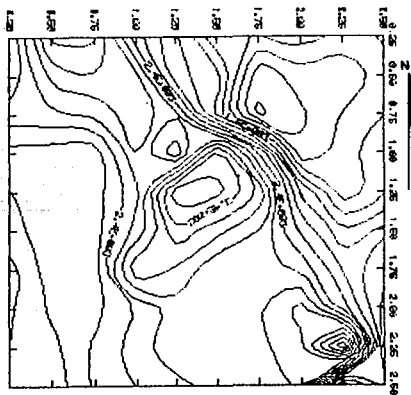
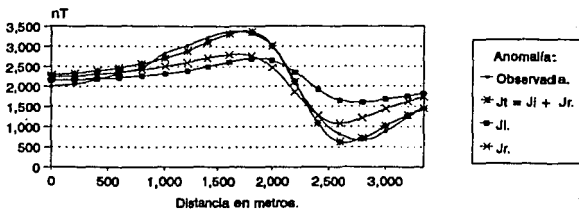


Fig. 4.36.- CD .4 de unided.

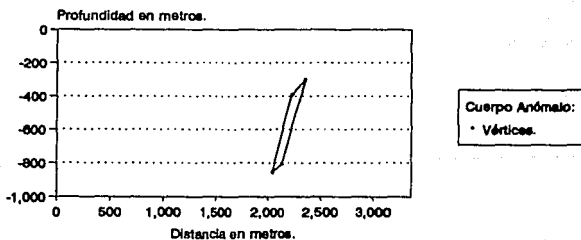
Modelación Magnetométrica Cuantitativa: Anomalía III.

Perfil Am-Am'. "Las Habillas", Guerrero.
Considerando la Magnetización total, Inducida y remanente.



Gráfica No. 4.37
 $k = .0169 \text{ S.I.}$
 $H = 41439 \text{ nT}$, $D=7.5$, $I=44.64$, $J_r=14792 \text{ mA/m}$, $D=80.25$, $I=20.15$

Cuerpo Anómalo Propuesto.



Gráfica No. 4.38

Tabla 6.1

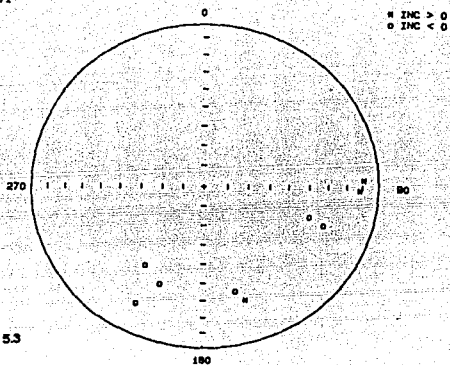
Bitio	N	E	$J_{\text{med}}(\text{A/m})$	Dec	Inc	α_{80}	k	p
12-9-7-1	8	9	14.345	146.6	-24.3	42	3	R
12-9-7-2	8	8	37.537	71.3	38.8	27	6	N
12-9-7-3	8	8	.0781	52.1	-43.3	11	26	R
12-9-7-4	3	3	.7843	96.2	31.3	6	379	N
12-9-7-5	2	2	37.01	6.2	15.9	56	20	N
12-9-7-6	1	1	23.98	169.3	14	-	-	N
12-9-3	10	10	1.982	129.9	80.7	33	3	N
Mede de la Polaridad normal	24	24	20.26	68.3	53.3	64	2.4	N
Reversa	16	17	7.211	105.3	-44.3	134	2.3	R
Mezclades	40	41	16.53	94.8	26.9	71	2	N

Nota - La intensidad de la MRN utilizada para la interpretación magnetométrica cuantitativa se obtuvo mediante el programa utilizado para el análisis estadístico de Fisher; de 41 especímenes solo se consideraron 36 y el resultado fue $\text{Int}=14792 \text{ mA/m}$, $\text{Dec}=80.25^\circ$ e $\text{Inc}=20.15^\circ$.

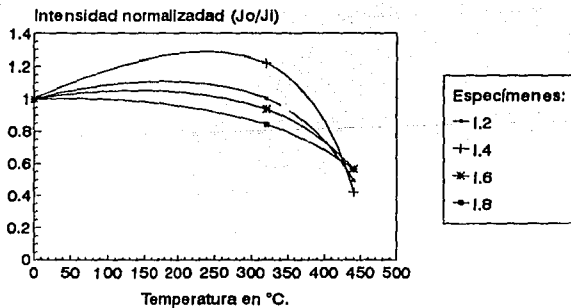
Tabla 6.2

Bitio	N	E	$J_{\text{med}}(\text{A/m})$	σ_{Med}	$Z(\text{BI})$	σ_Z	$Q(\text{H-33 A/m})$	MOF (mT)	MOF ($^\circ\text{C}$)
7-1	8	9	14.344	13.713	.03593	.01367	12.108	>80	435-480
7-2	8	8	37.398	37.2	.01947	.00290	58.438	-86-92.5	-700-800
7-3	8	8	.07726	.024	.00355	.00119	.65855	—	340-440
7-4	3	3	.78432	.224	.02439	.00157	.97470	>45	480
7-5	2	2	37.010	.266	.02327	.00028	48	>95	-700-800
7-6	1	1	23.982	-	.04109	-	17.618	-62	-600
9-3	10	10	1.9822	142	.01729	.00086	3.475	28-38	450-600

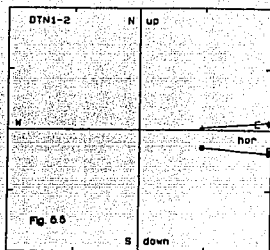
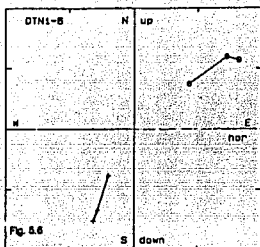
ANOMALIA-71



Intensidad normalizada vs. Desmagnetización térmica en °C.
 Pilotos del Sitio I.
 Núcleos

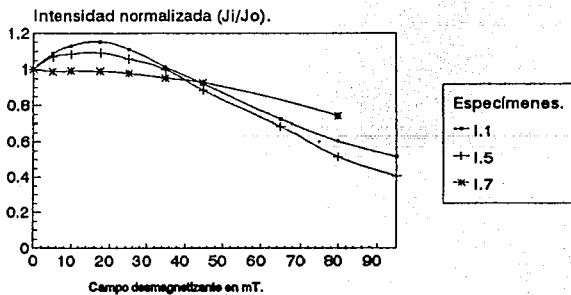


Tesis.
 Gráfica No. 5.4



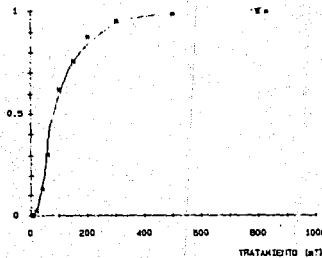
Intensidad normalizada vs. desmagnetización por CA.

Pilotos del Sitio I.
Núcleos.

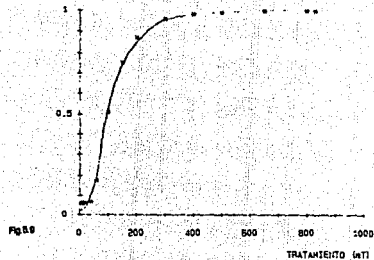


Tesis
Gráfica No. 57

INTENSIDAD NORMALIZADA (J_1/J_0)

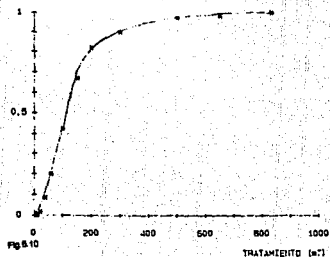


MUESTRA ISOHI.1 INTENSIDAD NORMALIZADA (J_1/J_0)

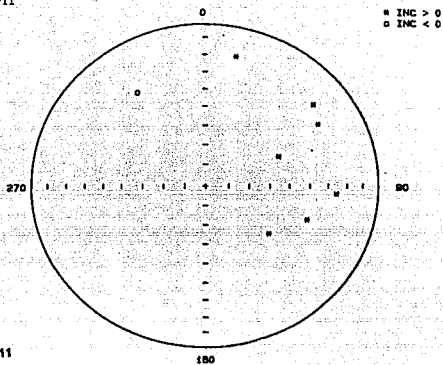


74

INTENSIDAD NORMALIZADA (J_1/J_0)

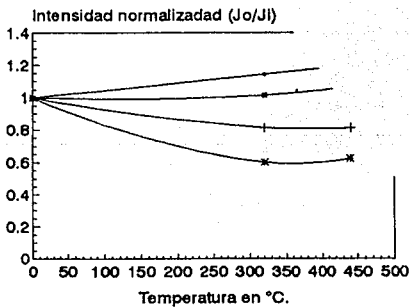


ANDALUZA-7II

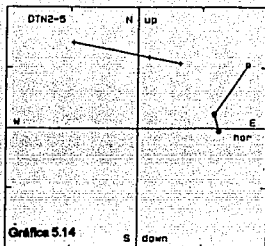
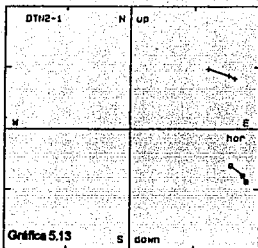


Gráfica 5.11

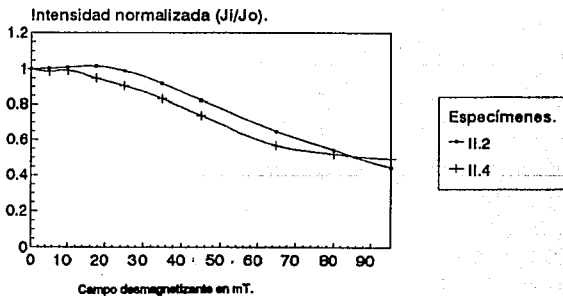
Intensidad normalizada vs. Desr
Pico



Tesis.
Gráfica No. 5.12



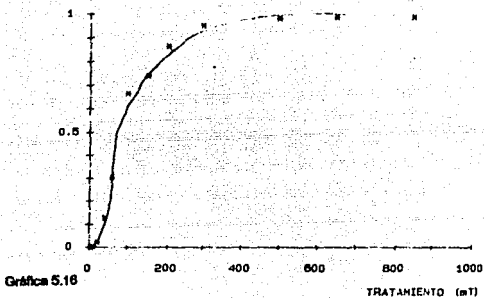
Intensidad normalizada vs. desmagnetización por CA.
Pilotos del Sitio II.
Núcleos.



Tesis
Gráfica No. 5.15

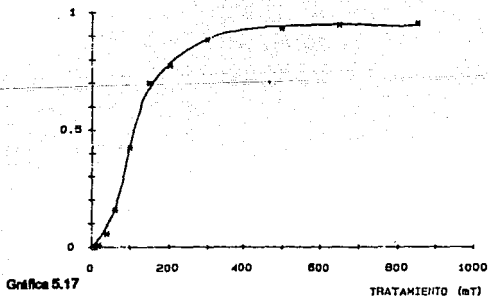
INTENSIDAD NORMALIZADA (J_1/J_0)

MUESTRA ISOTNII.2



INTENSIDAD NORMALIZADA (J_1/J_0)

MUESTRA ISOTNII.4



014-24-711

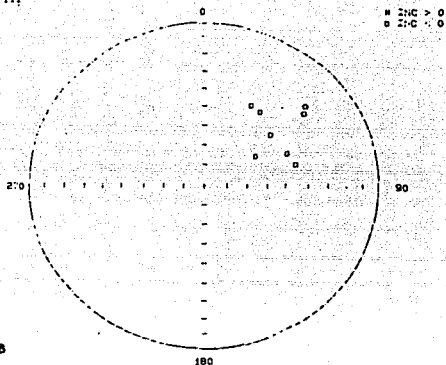
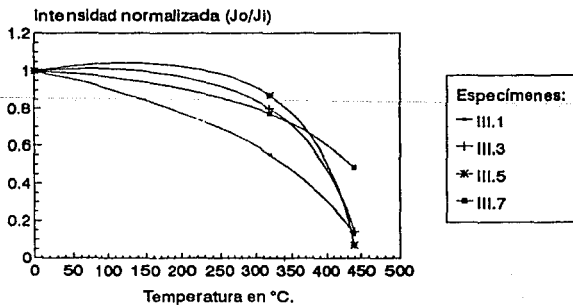
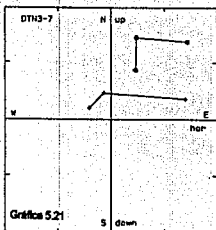
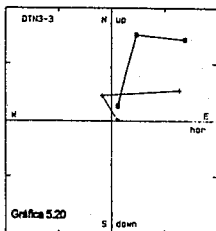


Gráfico 5.18

Intensidad normalizada vs. Desmagnetización térmica en °C.
 Péctos del Sdio III.
 NÚcleo.

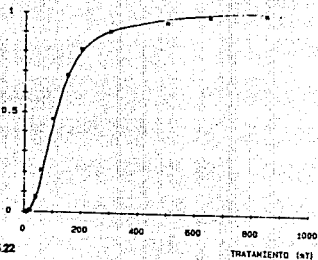


Tésis.
 Gráfico No. 5.19



INTENSIDAD NORMALIZADA (J1/J0)

MUESTRA ISOTIII.3



79

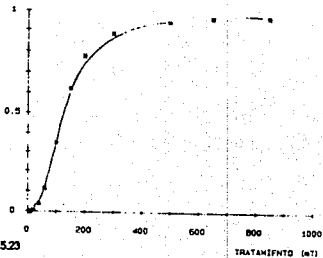
INTENSIDAD NORMALIZADA (J1/J0)

MUESTRA ISOTIII.5

INTENSIDAD NORMALIZADA (J1/J0)

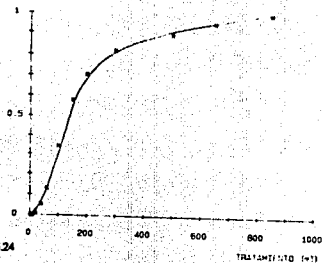
TRATAMIENTO (sT)

MUESTRA ISOTIII.6



TRATAMIENTO (sT)

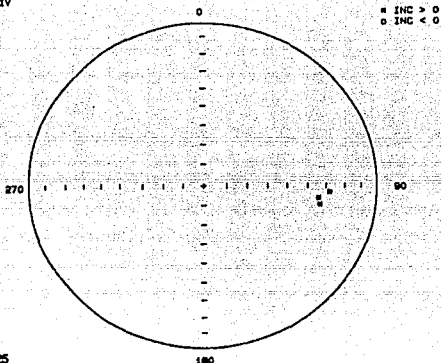
Gráfica 5.24



TRATAMIENTO (sT)

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

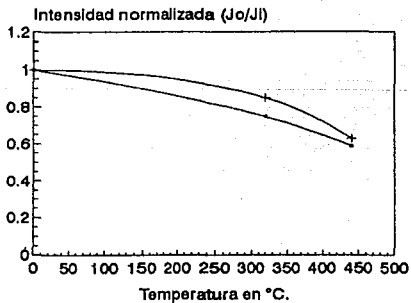
ANOMALIA-71V



Gráfica 5.25

Intensidad normalizada vs. Desmagnetización térmica en °C.

Pilotos del Sitio IV
Núcleos



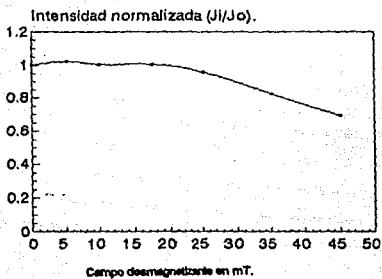
Especímenes:

—+— IV.1

+ IV.3

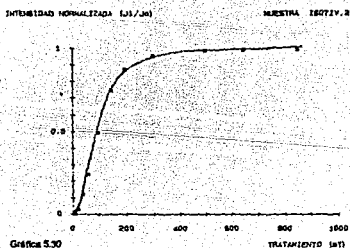
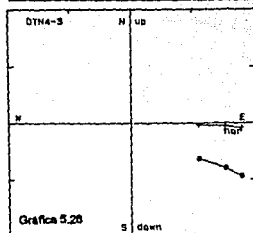
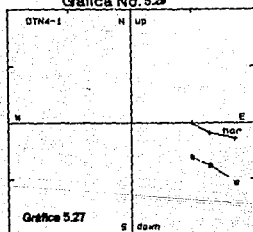
Tesis.
Gráfica No. 5.26

Intensidad normalizada vs. desmagnetización por CA.
 Piloto del Sitio IV.
 Núcleos

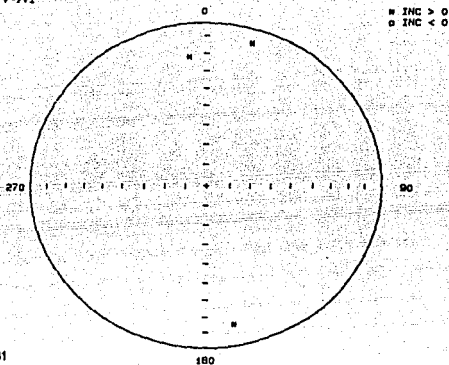


Especímenes.
 — IV.2

Tesis
 Gráfica No. 5.29

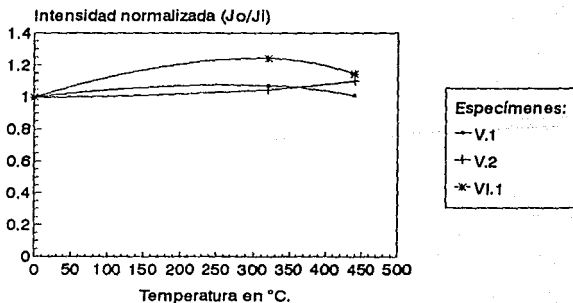


ANDALUZA-7V-7VI

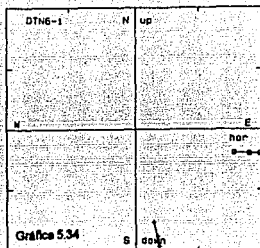
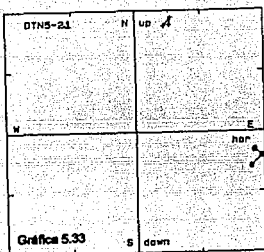


Gráfica 5.31

Intensidad normalizada vs. Desmagnetización térmica en °C.
 Pilas del Sitio V y VI.
 Núcleos

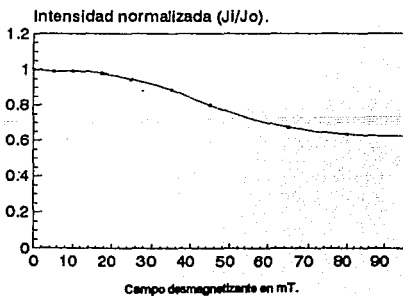


Tesis.
 Gráfica No. 5.32



Intensidad normalizada vs. desmagnetización por CA.

Piloto del Sitio V.
Núcleos.

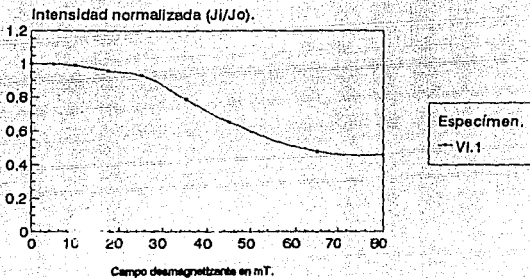


Especimen.
— V.2

Tesis
Gráfica No. 5.35

Intensidad normalizada vs. desmagnetización por CA.

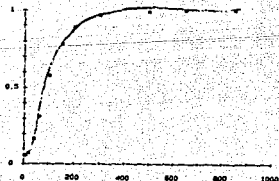
Piloto del Sitio VI.
Núcleos



Tesis

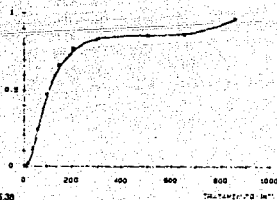
Gráfica No. 5.36

INTENSIDAD NORMALIZADA (J_i/J_o)



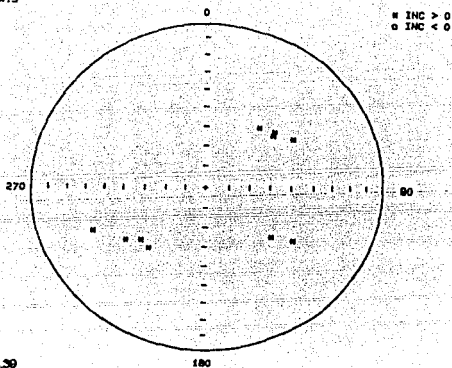
MUESTRA ISOTV. 2

INTENSIDAD NORMALIZADA (J_i/J_o)



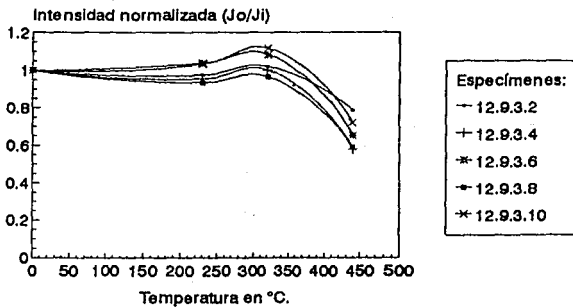
MUESTRA ISOTV. 1

ANOMALIA-9.3

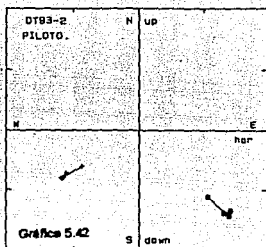
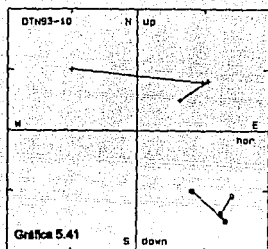


Gráfica 5.30

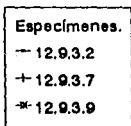
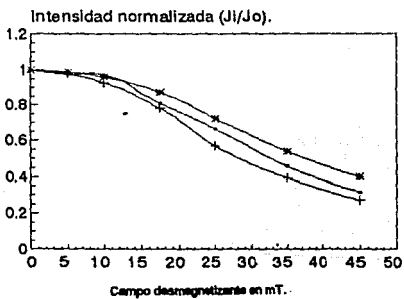
Intensidad normalizada vs. Desmagnetización térmica en °C.
Píctos del Sitio 12-9-3.
Núcleo



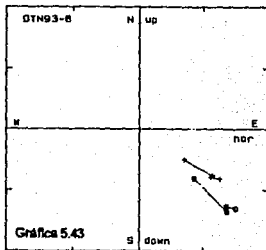
Tesis.
Gráfica No. 5.40



Intensidad normalizada vs. desmagnetización por CA.
Pilotos del Sitio 12-9-3.
Núcleos.



Tesis
Gráfica No. 5.44



INTENSIDAD NORMALIZADA (J1/J0)

MUESTRA ISOT9-3-2 INTENSIDAD NORMALIZADA (J1/J0)

MUESTRA ISOT 9-3-7.

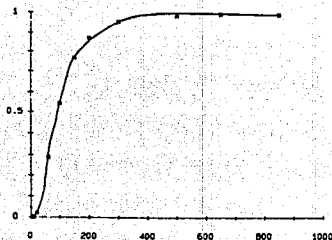


Gráfico 5.45

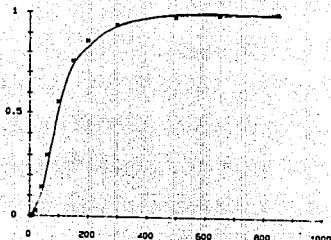


Gráfico 5.46

INTENSIDAD NORMALIZADA (J1/J0)

MUESTRA ISOT 9.3.9

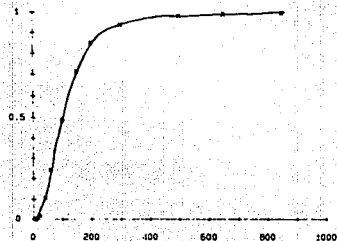
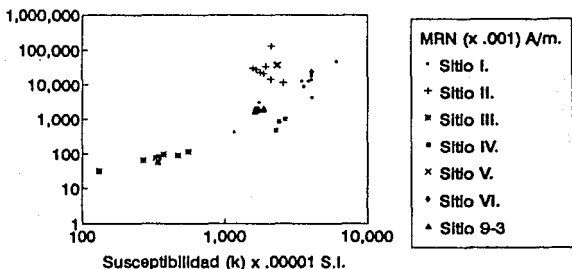


Gráfico 5.47

TRATAMIENTO (hT)

Gráfica de la MRN vs. k

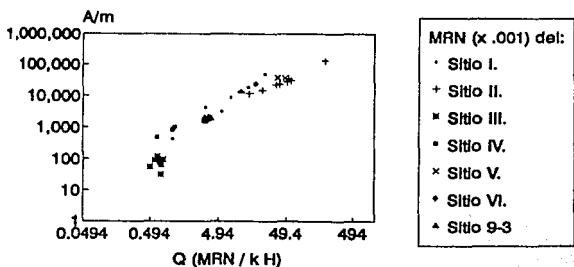
para los especímenes de la zona anómala 12-9-7 y 12-9-3.
"Las Habillas", Guerrero.



Tésls.
Gráfica No. 5.43

Gráfica de la MRN vs. Q

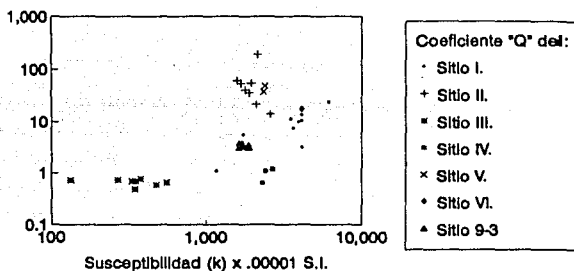
para los especímenes de la zona anómala 12-9-7 y 12-9-3.
"Las Habillas", Guerrero.



Tésls.
Gráfica No. 5.43

Gráfica del Coeficiente "Q" vs. K.

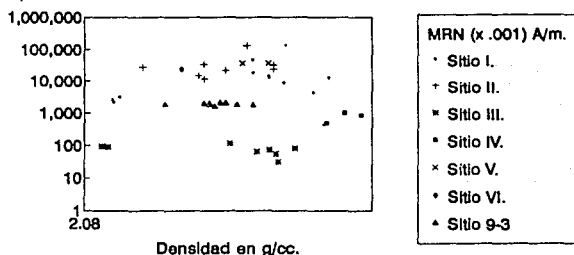
para los especímenes de la zona anómala 12-9-7 y 12-9-3.
"Las Habillas", Guerrero.



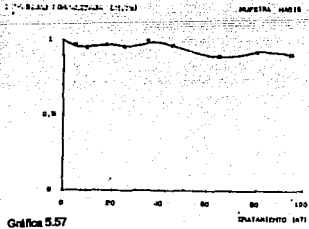
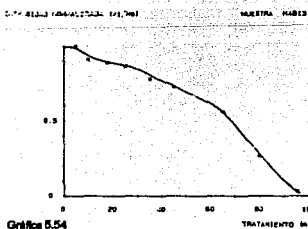
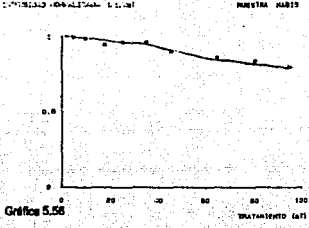
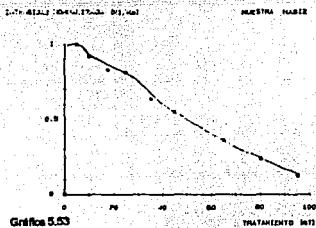
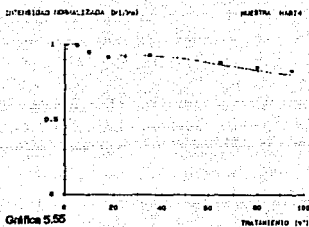
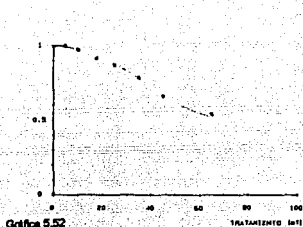
Tesis.
Gráfica No. 5.50

Gráfica de la MRN vs. Densidad.

para los especímenes de la zona anómala 12-9-7 y 12-9-3.
"Las Habillas", Guerrero.



Tesis.
Gráfica No. 5.51
La densidad esta en escala logarítmica.



TRATAMIENTO 5.50

MUESTRA 5.507

1.7421013 10000132.00 01.7.90

MUESTRA 5.508

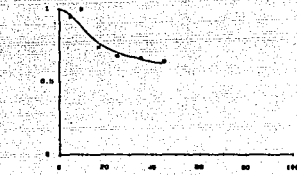
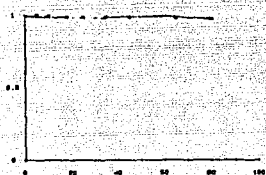


Gráfico 5.50

Gráfico 5.50

MUESTRA 5.507/VAL. 1.0

MUESTRA 5.508/VAL. 0.7

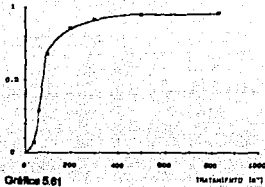
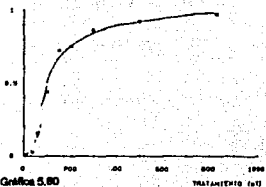


Gráfico 5.80

Gráfico 5.81

TRATAMIENTO 5.82

MUESTRA 5.807-VIII.9

MUESTRA 5.807-VII.9

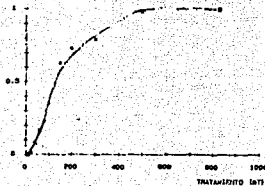
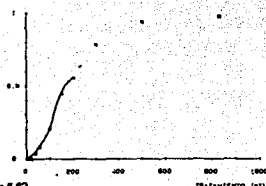


Gráfico 5.82

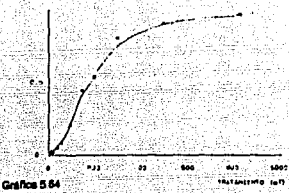
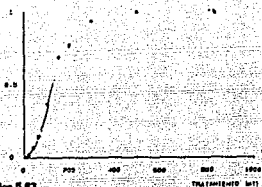
Gráfico 5.82

179.812-3 (04/12/17) (31,00)

MUESTRA 1507-16.3

179.812-3 (04/12/17) (31,00)

MUESTRA 1507-16.2

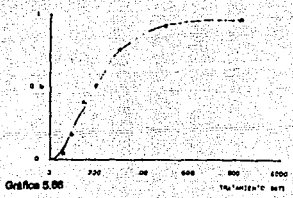
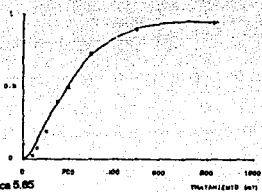


179.812-3 (04/12/17) (31,00)

MUESTRA 1507-17.3

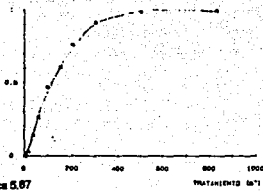
179.812-3 (04/12/17) (31,00)

MUESTRA 1507-17.4



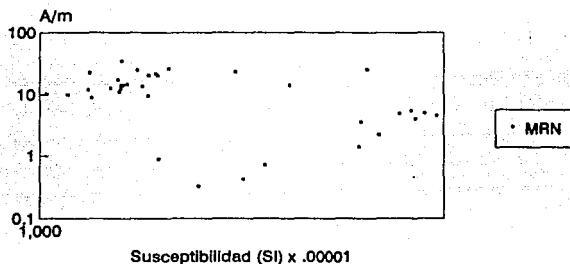
179.812-3 (04/12/17) (31,00)

MUESTRA 1507-18.4



GRAFICA DE LA MRN vs. k

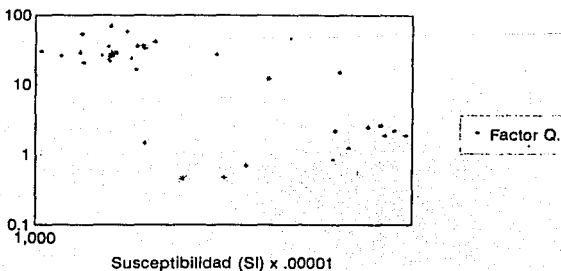
PARA LOS FRAGMENTOS DE LAS MUESTRAS DE BLOQUE.
"LAS HABILLAS", GRO.



Tésis.
Gráfica No. 5.68

GRAFICA DEL FACTOR "Q" vs. k

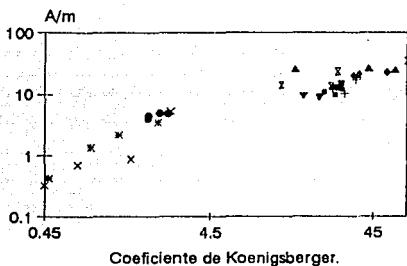
PARA LOS FRAGMENTOS DE LAS MUESTRAS DE BLOQUE.
"LAS HABILLAS", GRO.



Tésis.
Gráfica No. 5.69

Gráfico de la MRN vs. el factor "Q".

Fragmentos de nueve sitios.
Las Habillas, Guerrero.



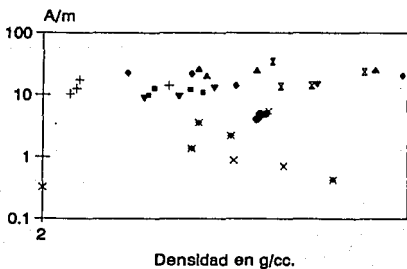
MRN del:

- ▼ Sitio I.
- + Sitio II.
- × Sitio VII.
- Sitio VIII.
- × Sitio IX.
- ◆ Sitio X.
- ▲ Sitio X'.
- × Sitio XI.2.
- Sitio 600.

Tésls.
Gráfica No. 5.70

Gráfico de la MRN vs. la Densidad.

Fragmentos de nueve sitios.
Las Habillas, Guerrero.



MRN del:

- ▼ Sitio I.
- + Sitio II.
- × Sitio VII.
- Sitio VIII.
- × Sitio IX.
- ◆ Sitio X.
- ▲ Sitio X'.
- × Sitio XI.2.
- Sitio 600.

Tésls.
Gráfica No. 5.71

BIBLIOGRAFIA.

- Alva-Valdivia, L., 1967. Paleomagnetismo y Magnetometría en la exploración de la margen continental sur de México. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias, Univ. Nat. Aut. Mex., México.
- Alva-Valdivia, L., 1991. Paleomagnetismo, magnetometría, minerografía y propiedades petrofísicas de Yacimientos de hierro del sur de México. Tesis de Doctor en Geofísica. UACPyP del CCH-UNAM.
- Baranov, V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetics map: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophys.* V. 22: 359-383.
- Bath, G. H., 1962. Magnetic anomalies and magnetizations of the Biwabick Iron-formation, Mesabi area, Minnesota. *Geophys.*, V. 27: 627-650.
- Bhattacharya, B. K., 1964. Magnetic Anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophys.*, V. 29: 517-553.
- Books, K. G., 1962. Remanent magnetism as a contributor to aeromagnetic anomalies. *Geophys.*, V. 27: 359-375.
- Campe, M. F. y Ramírez, J., 1979. La evolución geológica y la metalogénesis del noroccidente de Guerrero. Serie técnico-científica de la Universidad Autónoma de Guerrero, No. 1, 102 p.
- Campe, M. F. y Coney, P. J., 1983. Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in México. *Can. J. Earth Sci.*, 26, 1040-1051.
- Collinson, D. W., 1965. Origin of remanent magnetization and initial susceptibility of certain red sandstones. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, V. 9: 203-217.
- Collinson, D. W., 1983. *Methods in rock magnetism and paleomagnetism*. Ed. Chapman and Hall.
- Contreras-Tébar, D. F. y Ramírez-Cruz, L. C., 1985. Estudio Paleomagnético y magnetométrico en el área Agua de Obispo-Tierra Colorado, Estado de Guerrero, México. Tesis Ing. Geofísico. Univ. Nat. Aut. Mex., México.
- Cserna, Z. de, 1965. Reconocimiento geológico en la Sierra Madre del Sur de México, entre Chilpancingo y Acapulco, Estado de Guerrero. *Boletín del Instituto de Geología, UNAM*, No. 62, 77 p.
- Fisher, R. A., 1953. Dispersion on a sphere, *Proc. Roy. Soc. London*, A217, 295-305.
- Goodacre, A. K., 1969. Interpretación de anomalías gravimétricas y magnéticas para no especialistas (traducción). IPGH. No. 438.
- Graham, K. W., 1949. The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks. *J. Geophys. Res.* V. 54: 131-167.
- Irving, E., 1964. *Paleomagnetism and its application to geological and geophysical problems*. John Wiley & Sons.

- Klesse, E., 1970. Geology of the Ocotillo-huautlatoyac region and of the La Dicha stratiform sulphide deposit, state of Guerrero. *Bol. Soc. Geol. Mexicana*, V. 31, n. 2: 107-140.
- McElhinny, M. W., 1973. *Paleomagnetism and plate tectonics*. Cam. Univ. Press.
- _____ and Gough, D. H., 1963. The paleomagnetism of the Great Dyke of Southern Rhodesia. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, V. 7: 287-303.
- McMurry, E. W., 1970. Paleomagnetic results from Scottish lavas of lower Devonian age. *Paleogeophysics*: 253-262.
- Moskó, A., 1984. Digital filtering in geophysical exploration for oil. Ed. Pilman.
- Morán-Zenteno, D. J., 1986. Breve revisión sobre la evolución tectónica de México. *Geof. Int.*, V. 29: 9-37.
- _____, 1984. *Geología de la República Mexicana*. INEGI-FI. UNAM.
- _____, 1982. Investigaciones isotópicas de Rb-Sr y Sm-Nd en rocas cristalinas de la región de Tierra Colorada-Acapulco-Cruz Grande, Edo. de Guerrero. Tesis de Doctor en Geofísica. UACPyP del CCH. Univ. Nac. Aut. Mex. México.
- Nagata, T., 1953. Self-reversal of thermoremanent magnetization of igneous rocks. *Nature*, V. 172: 850.
- Nagata, T., 1961. *Rock magnetism*; Maruzen Company Ltd., Tokyo, 350 p.
- Nettleton, L. L., 1978. Gravity and magnetics in oil prospecting. Ed. Mac. Graw-Hill.
- O'Reilly, W., 1984. *Rock and mineral magnetism*. Chapman and Hall.
- Ortega-Gutiérrez, F., 1978. *Estratigrafía del complejo Acatlán, estados de Puebla y Oaxaca*. Univ. Nal. Aut. Mex. *Inst. Geología, Revista*, 2, 112-131.
- _____, 1981. La evolución tectónica Promisipica del Sur de México. *Univ. Nal. Aut. Mex., Inst. Geología, Revista* 5, 140-157.
- Paríjoto-Alor, J., 1982. El evento magmático "Balsas" (Paleógeno) de la sierra madre del sur, México. III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología, Salamanca, España.
- Paríjoto-Alor, J., 1983. Geocronometría del magmatismo Cretácico-Terciario de la sierra madre del sur. *Bol. Soc. Geol. Mexicana*, V. 44, n. 1: 1-20.
- Parasnis, D. S., 1966. *Principles of applied geophysics*. 4th ed. Ed. Chapman and Hall.
- Parry, L. G., 1967. Physical principles of demagnetization: in *methods in Paleomagnetism*. Editado por D. Collinson, K. M. Creer y S. K. Runcorn. American Elsevier Publishing Co.
- Pyne, M. A., 1981. SI and Gaussian CGS units, conversion and equations for use in geomagnetism. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 26: P10-P16.

- Sonanyako, W. E. and McElhinny, M. W., 1981. Hysteresis and susceptibility characteristics of magnetite and titanomagnetites: interpretation of results from basaltic rocks. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, V. 26: 47-55.
- Soto-Cuervo, A., 1969. Sistema de procesamiento geofísico. Tesis de Maestría en Ingeniería (Exploración). DEPEI, Univ. Nal. Aut. de Mex.
- Tahvani, M., 1965. Computation with the help of digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape. *Geophys.*, V. 30: 797-817.
- Tarling, D. H., 1971. Principles and applications of paleomagnetism. Ed. Chapman and Hall.
- Telford, W. M., 1976. Applied geophysics. Ed. Cam. Univ. Press.
- Thollier, E., 1951. Propriétés magnétiques des terres cuites et des roches. *J. Geophys. Radium*, 12, 205-218.
- Urrutia-Fucugauchi, J., 1976. Estudio Paleomagnético de rocas ígneas del noroeste del Edo. de Jalisco, México. Tesis de Maestría en Ciencias (Geofísica) UNAM, 292 p.
- _____, 1977. Importancia del magnetismo remanente natural en la interpretación de anomalías magnéticas. *Bol. Asoc. Mex. de Geofísica*, V. 18: 83-116.
- _____, 1981. Paleomagnetism of the Miocene Jantatalco granodiorites and Tepexco volcanic group and inferences for crustal block rotations in central México. *Tectonophysics*, 76: 149-168.
- _____ et al., 1988. Paleomagnetismo y magnetoestratigrafía de la sierra de la Primavera, Jalisco. *Geof. Int.*, V. 27, n. 3: 395-414.
- Valencio, D. A., 1977. El magnetismo de las rocas. Ed. Universitaria de Buenos Aires, Argentina.
- Vidal, R. y colaboradoras, 1980. El conjunto petrolectónico de Zihuatanejo, Guerrero-Coahuacán, Michoacán. *Soc. Geol. Mexicana, Resúmenes de la V Convención Geológica Nal.*, p.p. 111-112.
- Zenteno-Zuñiga, E. A., 1984. Interpretación de anomalías aeromagnéticas en la región sur de Michoacán, México. Tesis de Ing. Geofísico, Fac. Ingeniería, Univ. Nac. Aut. Mex., México.
- Zlotz, I. and Andreasen, G. E., 1967. Remanent magnetization and aeromagnetic interpretation. *Mining Geophysics*, V. 2: 569-590.