

14



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

INSTALACION DE UN OBSERVATORIO MAGNETICO ESTANDAR DE ULTIMA GENERACION: ESTUDIO GEOFISICO, EMPLAZAMIENTO Y OPERACION

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO GEOFISICO

P R E S E N T A N :

CARLOS LORA DE LA FUENTE  
RODRIGO HERNANDEZ ORDOÑEZ

ASESOR: ING. GERARDO CIFUENTES NAVA



CD. UNIVERSITARIA

ENERO 2003

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 esta 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.



FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-1139

SR. CARLOS LORA DE LA FUENTE  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Gerardo Cifuentes Nava y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

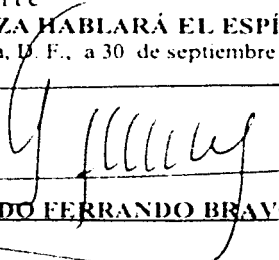
**INSTALACIÓN DE UN OBSERVATORIO MAGNÉTICO ESTÁNDAR DE ÚLTIMA GENERACIÓN: ESTUDIO GEOFÍSICO, EMPLAZAMIENTO Y OPERACIÓN**

- I INTRODUCCIÓN
- II GEOMAGNETISMO Y OBSERVATORIOS MAGNÉTICOS
- III METODOLOGÍA
- IV CASOS DE ESTUDIO
- V EMPLAZAMIENTO Y OPERACIÓN DE UN OBSERVATORIO MAGNÉTICO ESTÁNDAR
- VI CONCLUSIONES  
BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria, D. F., a 30 de septiembre de 2002  
EL DIRECTOR

  
ING. GERARDO FERRANDO BRAYO

GFB\*RLLR\*gtg  




ESTADOS UNIDOS MEXICANOS  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-1142

**SR. RODRIGO HERNÁNDEZ ORDÓNEZ**  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Gerardo Cifuentes Nava y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**INSTALACIÓN DE UN OBSERVATORIO MAGNÉTICO ESTÁNDAR DE ÚLTIMA GENERACIÓN: ESTUDIO GEOFÍSICO, EMPLAZAMIENTO Y OPERACIÓN**

- I INTRODUCCIÓN
- II GEOMAGNETISMO Y OBSERVATORIOS MAGNÉTICOS
- III METODOLOGÍA
- IV CASOS DE ESTUDIO
- V EMPLAZAMIENTO Y OPERACIÓN DE UN OBSERVATORIO MAGNÉTICO ESTÁNDAR
- VI CONCLUSIONES  
BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria, D. F., a 30 de septiembre de 2002  
EL DIRECTOR

  
ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB\*RLLR\*gtg

pp

## Dedicatoria.

**A mis padres:** Que por ellos esto fue posible.

**A mis hermanas:** Con su apoyo me brindaron la fortaleza necesaria para concluir este trabajo.

**Carlos**

## Agradecimientos.

A la UNAM por permitirme ser universitario, a la Facultad de Ingeniería por ser la fuente de mis conocimientos, al Instituto de Geofísica por todas las facilidades proporcionadas para este trabajo y a todos mis profesores por compartir sus experiencias y ser un ejemplo.

A mi abuelo Tele: Por el gran apoyo brindado durante toda mi vida.

A mi tía Rosalba: Por su cariño, apoyo y comprensión.

A la familia Emiliano Lora: Que en todo momento me dieron su cariño, ayuda, comprensión y por creer en mí.

A la Sra. Estela Zepeda y al Sr. Ismael Herrera: Por su confianza, apoyo y por su inigualable amistad.

A Mony: Por proporcionarme el apoyo cuando fue necesario, por compartir conmigo muchos momentos felices, por la motivación y porque sé que seguiré contando con ella.

A Martha: Por ser mi gran amiga y por contar con toda su ayuda y compañía en todo momento.

A Efraín, Karina, Gerardo, Carlos A., Rogelio, Mónica G. y David: Por su amistad y por los momentos que hemos compartido en su debido tiempo.

A Mayolo y Antón: Por la buena amistad que inició junto con nuestra carrera universitaria, por su infinita confianza y por contar con ellos en cualquier momento.

A la Fam. López Vargas, a Sergio y a Pepe: Por su excelente amistad.

A Vero: Por su gran apoyo moral siempre presente y por todos los buenos momentos que hemos pasado.

A Rho: Por compartir y ser una pieza fundamental en este trabajo y por ser un inigualable compañero en las aulas y en el campo.

A Chela, Vane, Ale, Pico, Bruno, Beto, Roguer, Rulo, Gibran, Aristóteles y Paco: Por la motivación en momentos de presión, por hacer el trabajo agradable, por la confianza y por la ayuda en los momentos difíciles.

A **Pao**: Por su amor, cariño, comprensión, ayuda, paciencia y empuje final para la culminación de este trabajo.

A Gerardo Cifuentes: Por ser un gran profesor, por proporcionarme su amistad, por enseñarme como es el trabajo de campo, por permitirme formar parte de un gran grupo de trabajo y por toda su aportación para la realización de esta tesis.

A Esteban Hernandez: Por su magnífica amistad y paciencia, por las grandes aportaciones y por compartir sus conocimientos para la llevar a cabo este trabajo.

Al Dr. Osvaldo Sanchez: Por ser uno de mis mejores profesores en la Facultad y por su compartir la inigualable experiencia en campo.

Y a toda la gente que estuvo a mi alrededor desde el comienzo  
Algunos siguen hasta hoy  
¡Gracias!

Carlos

## DEDICATORIA

**A Judith ...**

*"...uno solo no puede conservar la fe en si mismo. Es necesario que poseamos un testigo de nuestra fuerza; alguien que señale los golpes, que lleve la cuenta de los puntos, que nos corone en el día de la recompensa..."*

*-François Mauriac-*

**Rodrigo.**

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primordialmente a mi alma mater: la Facultad de Ingeniería, por la inigualable posibilidad de permitirme llegar hasta aquí, por haberme guiado en este difícil camino, por esta gran formación, por exigirme excelencia y por ser una parte esencial de mi vida.

Agradezco también al Instituto de Geofísica por haberme recibido, por todos estos años en los que aprendí mucho, por el apoyo, por hacerme partícipe de algunas de las investigaciones y proyectos que en él se desarrollan y desde luego, por haber contribuido a mi formación profesional con toda la experiencia de esta gran institución.

Gracias a mis profesores: Miguel Vera, Jorge Nieto, Antonio Márquez, Emiliano Campos, José Luis Rodríguez, Ambrosio Aquino y Omar Delgado, por sus valiosas enseñanzas, por impregnarme de conocimientos, porque con su gran capacidad y sabiduría me fueron formando, por invitarme un poco de lo mucho que son y por haberme mantenido en el camino; al Dr. Osvaldo Sánchez por todo lo que aprendí de él, por sus valiosísimos comentarios y por las oportunidades que me brindó; pero sobremanera al Maestro Esteban Hernández y al Ingeniero Gerardo Cifuentes, porque me dieron la oportunidad de colaborar en el grupo de Geomagnetismo, por su paciencia, por toda la ayuda recibida no sólo para el presente trabajo, por enseñarme que se puede hacer más con menos, por la confianza que siempre tuvieron en mí, por las valiosas aportaciones en campo, por todas esas incontables contribuciones a mi crecimiento profesional y por su gran apoyo aún fuera de las actividades académicas –muchas gracias–.

Estoy profundamente agradecido con mi familia, por el gran apoyo de Rogerio, de Ana Elia, de Otilia y Rodolfo, gracias por su incondicional ayuda, y de manera muy especial a mis padres Rodolfo y Ana Maria, porque gracias al apoyo que siempre me dieron pude alcanzar esta meta. Desde luego a mis compañeros y amigos, a Carmen, Arturo y Sebastián, por tantos años de amistad, por aguantarme en las buenas y en las malas.

A Bruno, a Chela y a Paco, porque me hicieron ver que siempre hay un momento para hacer un alto. A Raúl, a Edmundo a Keren, por su compañía y por hacerme menos pesado el tránsito por la escuela.

Por supuesto a Giovanni, a Benjamín, a Héctor y a Marcos, por su amistad, por todas las aventuras vividas, por los viajes, por todas las que pasamos, por su apoyo y por su peculiar forma de pasar el tiempo. También quiero agradecer mucho a Alejandra, por su alegría, por aguantarme en campo y sobre todo por ser una buena amiga.

De manera sobresaliente a Vanessa, porque con ella compartí tanto, desde desveladas por las tareas, trabajo muy duro en campo, largos caminos, penas y por supuesto muchos momentos bellos, gratas experiencias, pero principalmente mucha ayuda y apoyo, gracias amiga.

Muchas gracias a Nadia por ser tan buena persona conmigo, a Erika y Espriu, y con una mención especial a Humberto, por todos esos momentos de regocijo, por los libros, por su forma inconfundible de expresarse, de ser y de pensar. Asimismo quiero hacer patente un especial agradecimiento a Mauricio y a Carlos, por los provechosos comentarios, por lo que vivimos juntos, por su tolerancia, pero desde luego por la gran ayuda que recibí de ambos y porque en este último tramo fueron esenciales.

A un gran amigo, al que nunca podré agradecer todas sus enseñanzas –Fermin–, porque siempre fue un ejemplo de trabajo y dedicación, por su forma de vivir, por su enorme humildad, por su gran capacidad, pero sobre todo por su gran calidad humana, gracias. A todos aquellos que por mi mala memoria omita, porque de ellos y de todos soy un poco.

Y muy, pero muy especialmente a Judith, por su amistad, por su gran apoyo, por sus enseñanzas, por su entereza, por su paciencia, por su comprensión, por su hermosa compañía, por su enorme bondad, por todos los detalles, por darle equilibrio a mi vida y por su amor: GRACIAS JUD.

Rodrigo.



1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. GEOMAGNETISMO Y OBSERVATORIOS MAGNÉTICOS .....	5
2.1 GEOMAGNETISMO.....	5
2.1.1 Historia del geomagnetismo.....	5
2.1.2 El geomagnetismo en México.....	5
2.1.3 Vector del campo geomagnético.....	7
2.1.4 Caracterización del campo geomagnético.....	8
2.1.5 Variaciones temporales del campo geomagnético.....	14
2.1.6 Unidades de medición.....	16
2.2 OBSERVATORIOS MAGNÉTICOS.....	17
2.2.1 Construcciones para el observatorio.....	19
2.2.2 Evitando interrupción en la grabación de datos.....	25
2.2.3 Algunos consejos prácticos.....	25
2.3 CONDICIONES GEOFÍSICAS.....	27
2.4 INSTRUMENTACIÓN Y OPERACIÓN.....	29
2.4.1 Magnetómetros de bobina de inducción.....	30
2.4.2 Magnetómetros Fluxgate (Núcleo de saturación).....	31
2.4.3 Magnetómetro de precesión protónica (PPM).....	34
2.4.4 Magnetómetro de bombeo óptico.....	36
2.4.5 Magnetómetros basados en el efecto Zeeman.....	36
3. METODOLOGÍA.....	38
3.1 CORRECCIÓN POR VARIACIÓN DIURNA.....	38
3.2 REDUCCIÓN AL POLO.....	38
3.3 GRADIENTE HORIZONTAL.....	42
3.4 PROCESAMIENTO DE DATOS.....	44
3.4.1 Control de calidad.....	44
3.4.2 Corrección por variación diurna.....	45
3.4.3 Reducción al polo.....	45
3.4.4 Gradiente horizontal.....	46
4. CASOS DE ESTUDIO.....	48
4.1 OBSERVATORIO MAGNÉTICO DE TEOLOYUCAN.....	49
4.1.1 Ubicación y situación geográfica.....	49
4.1.2 Fisiografía y geología.....	50
4.1.3 Exploración magnética.....	51
4.1.4 Resultados.....	51
4.2 CAMPUS JURQUILLA, UNAM.....	55
4.2.1 Ubicación y situación geográfica.....	55
4.2.2 Fisiografía y geología.....	56
4.2.3 Exploración magnética.....	57
4.2.4 Resultados.....	57
4.3 OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO DE COLIMA.....	62
4.3.1 Ubicación y situación geográfica.....	62
4.3.2 Fisiografía y geología.....	63
4.3.3 Exploración magnética.....	65
4.3.4 Resultados.....	65
4.4 COENEO.....	69
4.4.1 Ubicación y situación geográfica.....	69
4.4.2 Fisiografía y geología.....	71
4.4.3 Exploración magnética.....	71

4.4.4 Resultados .....	72
5. EMPLAZAMIENTO Y OPERACIÓN DE UN OBSERVATORIO MAGNÉTICO ESTÁNDAR.	75
5.1 MATERIALES Y EQUIPOS .....	75
5.1.1 Magnetómetro fluxgate de tres componentes (DMI) .....	75
5.1.2 Magnetómetro geometrics G-856.....	77
5.1.3 Magnetómetro DI-FLUX (declinómetro e inclinómetro) .....	78
5.2 TARJETA Ad77 .....	79
5.3 SOFTWARE Ad77.....	81
5.4 FORMAS DE REGISTRO.....	84
5.4.1 Protocolo de Observaciones Absolutas .....	85
5.4.1.1 Formato para el DI-flux.....	87
5.4.1.2 El formato electrónico .....	88
5.4.2 Azimut astronómico de referencia.....	90
5.4.3 Cálculo de H,D, y Z a partir de D,F e I .....	91
5.4.4 Error de sonda, error de sitio y error de azimut.....	93
5.5 RESULTADOS DE MEDICIONES ABSOLUTAS .....	94
5.6 MAGNETOGRAMAS DEL DMI .....	94
6. CONCLUSIONES.....	100
6.1 Selección del sitio.....	100
6.2 Pruebas de sitio.....	102
ANEXO 1 .....	104
ANEXO 2 .....	127
Corrección por variación diurna.....	127
Reducción al polo.....	131
Gradiente horizontal.....	135
ANEXO 3 .....	139
BIBLIOGRAFÍA .....	148

## 1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento de la Tierra como un imán, originó la necesidad de conocer sus causas, esto motivó a gran cantidad de personas para estudiar el geomagnetismo, el interés tan grande que existía por este conocimiento hizo que se instalaran un gran número de observatorios magnéticos, que hace posible conocer la distribución geográfica del campo geomagnético. El estudio de los fenómenos geomagnéticos dio también lugar a encontrar ciertas conexiones con las variaciones cósmicas y mediante estas relaciones podemos encontrar una explicación de algunos de los fenómenos que ocurren y han ocurrido en la Tierra.

Las mediciones de la declinación magnética más antiguas de las que se tiene registro en México, son de finales del siglo XV, que fueron realizadas por Thomas Cavendish en 1576 en La Paz. El primer Observatorio Magnético en México, fue puesto en operación cuando en 1879 se instaló en Palacio Nacional el Observatorio Meteorológico y Magnético Central, este contaba con un magnetómetro unifilar Tompson para determinar la componente horizontal (H) y la declinación (D) del campo geomagnético, así como una brújula Negretti-Zambra para la inclinación (I).

El único observatorio con el que se cuenta en México, es el Observatorio Magnético de Teoloyucan, que se encuentra ubicado en el poblado de Teoloyucan, en el Estado de México, y depende del Instituto de Geofísica de la UNAM.

La red mundial de observatorios magnéticos tiene una cobertura escasa en Latinoamérica y en las bajas latitudes de la porción media y oriental del Océano Pacífico, esta carencia junto con la perturbación de observatorios magnéticos en operación por los desarrollos demográficos, hace pensar en la necesidad de localizar sitios para la instalación de nuevos observatorios que puedan funcionar por largos periodos de tiempo sin que resulten afectados y además cubran áreas en donde se necesiten datos de variación del campo geomagnético.

Las condiciones de operación para un observatorio, que se describen en este trabajo, son cada día más críticas para el Observatorio Magnético de Teoloyucan, por tal motivo, surge la necesidad de instalar un nuevo observatorio que trabaje de manera simultánea y de ser necesario que sustituya en el futuro al ya existente, para esto se realizaron diversos estudios en varias localidades, para tratar de elegir la que mejor cumpla con las condiciones para la instalación.

Los sitios de estudio se encuentran localizados en distintas partes del país, con condiciones geofísicas, geológicas y sociales diferentes entre ellos, tratando de encontrar el más óptimo para el proyecto de instalación, las zonas sujetas a estudio en el presente trabajo fueron tres: El primer estudio fue realizado en el campus de la UNAM en Juriquilla en el estado de Querétaro, realizando el estudio para tres áreas de este sitio, el segundo se realizó en el Observatorio Vulcanológico de Colima, dependiente de la Universidad de Colima, localizado en Villa de Alvarez, Colima; en el cual se realizaron los estudios para dos áreas del terreno con el que este cuenta; y el tercero fue realizado en Coeneo, Michoacán; en el Observatorio de Centelleo Interplanetario, dependiente del Instituto de Geofísica de la UNAM, en el cual se ha realizado el estudio para una zona. La adquisición de los datos de campo, se realizó en diferentes años, 2000, 2001 y 2002 respectivamente. Y todos estos estudios fueron calibrados con uno más que se realizó en las instalaciones del

Observatorio Magnético de Teoloyucan en el año 2002. Dichos estudios comprenden además de los levantamientos magnéticos, observaciones solares para la definición del azimut astronómico de la marca de referencia y observaciones absolutas para el cálculo de la declinación(D) y de la inclinación (I) magnéticas.

La magnetometría de los sitios fue procesada y estudiada mediante un software desarrollado expresamente para el objetivo de esta tesis (Anexo 2), donde se incluyen correcciones por variación diurna, reducción al polo y gradiente horizontal, procesos auxiliares para el análisis de las condiciones geofísicas necesarias para un sitio destinado a un observatorio magnético.

El nuevo observatorio contará con un magnetómetro fluxgate vectorial de 3 componentes para el registro de las variaciones magnéticas, con un magnetómetro de precesión protónica y con un magnetómetro de declinación e inclinación DI-flux. Las primeras pruebas de sitio fueron realizadas satisfactoriamente y se espera que con recursos suficientes para el próximo año (2003) puedan ser construidas las edificaciones que albergaran definitivamente la instrumentación y el registro de los datos generados por ésta.

## **2. GEOMAGNETISMO Y OBSERVATORIOS MAGNÉTICOS**

### **2.1 GEOMAGNETISMO**

#### **2.1.1 Historia del geomagnetismo**

Fueron los Chinos quienes estudiaron el magnetismo por primera vez hace más de 4,500 años. A pesar de esto hubo que esperar a que los Griegos difundieran en el mundo occidental las propiedades de una roca llamada magnetita y su uso práctico (la brújula). Es muy probable que las descripciones imaginativas de Marco Polo sobre la tecnología china hayan contribuido a la difusión del uso de la aguja imantada en Europa.

La cita europea más antigua acerca de la brújula fue hecha por A. Neckhan en 1190 d.C. Como no hay documentos que claramente indiquen el uso de la brújula es conveniente llamar "periodo prehistórico del Geomagnetismo" al tiempo anterior a las grandes navegaciones. Los viajes vikingos a Groelandia y América del Norte, así como los primeros descubrimientos portugueses, pueden estar ligados al uso de la brújula. En el siglo XVII se planteó un nuevo problema para la navegación, lo que entonces se llamó "la variación de la variación de la aguja" (que no es sino la variación de la declinación con respecto a la posición geográfica).

Fue en el año 1600, cuando W. Gilbert publicó su obra "De Magnet", donde el geomagnetismo ya no fue tratado como una fuerza oculta o de origen inexplicable. Por primera vez se utilizaron conceptos científicos y el método experimental para explicar la orientación de una aguja imantada (Vicente Reyes, 1884).

Gracias a tales descubrimientos y a que cada vez más se dibujaban cartas isogónicas (gran auxiliar para la navegación), fue que a este periodo siguió otro de descubrimientos y conquistas de tierras nuevas. No obstante el desarrollo de las medidas geomagnéticas en el inicio del siglo XIX, el geomagnetismo tenía sólo un carácter cualitativo, pues se limitaba a definir la posición de una aguja imantada, se medían dos cantidades, la declinación y la inclinación que representaban el desvío de la aguja de la posición "normal". C. F. Gauss fue el primero en hacer un trabajo de investigación experimental para medir la componente horizontal H, este trabajo desencadenó en el nacimiento formal del geomagnetismo como ciencia.

A partir de finales del siglo XIX se crearon organizaciones que derivaron en estudios globales, realizando, por ejemplo, mediciones simultáneas en los observatorios magnéticos. Para 1931 se creó la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG). Donde una de las asociaciones que la conforman es la International Association for Geomagnetism and Aeronomy (IAGA, por sus siglas en inglés) (Luis Muniz Barreto, 1997).

#### **2.1.2 El geomagnetismo en México**

Se han efectuado determinaciones de la declinación magnética en México desde finales del siglo XV, dichas observaciones fueron hechas por Thomas Cavendish en 1576 en La Paz, Cabo Corrientes, así como en Manzanillo. En el Golfo de México se tienen registros de observaciones hechas por Sir Dudley en 1630 en el Puerto de Veracruz. Para el centro del territorio los datos más antiguos fueron los obtenidos en la Ciudad de México por A. Alzate y Velásquez de León en 1769 y 1775, y en 1797 por A. von Humboldt.

A partir de 1857 comenzaron a realizarse observaciones de campo geomagnético en forma continua y en un lugar fijo con los primeros datos observados en la Escuela de Minería. Diversos observatorios operaron en diferentes épocas y sitios hasta la fundación del Observatorio Magnético de Teoloyucan en 1914.

Observatorio	Coordenadas geográficas	Periodo de operación	Instrumento usado
Escuela de Minería (Palacio de Minería)	Latitud = 19° 28' 12.3" Norte Longitud = 99° 07' 08.4" = 6h 36m 28.56s W de G Altitud = 2290 metros	1857-1877	Brújula Gambey para D y Brújula Blut para I.
Observatorio Meteorológico Central	Latitud = 19° 26' Norte Longitud = 99° 06' 45" = 6° 36' 27" W de G	1879-1887	Magnetómetro Thompson para H y D, y Brújula Negretti-Zambra para I.
Observatorio Astronómico de Tacubaya	Latitud = 19° 24' 18" Norte Longitud = 99° 11' 40" = 6h 36m 46.7s W de G Altitud = 2290 metros	1889-1902	Magnetómetro Elliot Dover para D y H, Brújula Negretti-Zambra para I. Variómetros Carpentier para registro continuo.
Observatorio de Cuajimalpa	Latitud = 19° 22' 24" Norte Longitud = 99° 17' 00" = 6h 37m 0.0s W de G Altitud = 2783 metros	1902-1911	Magnetómetro Elliot Dover para D y H, Brújula Negretti-Zambra para I. Variómetros Carpentier para registro continuo.
Observatorio Magnético de Teoloyucan	Latitud = 19° 44' 47.5" Norte Longitud = 99° 10' 00.4" = 6h 36m 43.6s W de G Altitud = 2280 metros	1914-1978	Magnetografos Mascart, Magnetómetro Dover, Galvanómetro con inductor terrestre de la marca Edelman y Balanza magnética (1921). Magnetometro tipo C.I.W.(1929) y Magnetografos tipo Eschenhagen de la Casa Askania (1931).
Observatorio Magnético de Teoloyucan	Latitud = 19° 44' 45.100" Norte Longitud = 99° 11' 35.735" Oeste Altitud = 2280 metros	1978-2002	Variómetros Askania. Magnetometro Ruska 3055 para D y H, Magnetografos QHM para H y un Magnetometro de precesión nuclear de la marca Geometrics para F.

En el año 1978 el observatorio tuvo que ser trasladado a otro terreno, dentro del mismo poblado y sus coordenadas geográficas son:

Latitud = 19° 44' 45.100" Norte  
Longitud = 99° 11' 35.735" Oeste  
Altitud = 2280 metros

Mostramos una tabla con los diferentes periodos de operación, que quedan marcados por el equipo en operación.

Periodo	Variógrafos	Absolutos
1978-1985	Askania con arreglo Eschenhagen de tres componentes.	Inductor terrestre Ruska magnetómetro Ruska para H. PPM Geometrics G-816 para F.
1986-1996	Askania con arreglo Eschenhagen de tres componentes.	PPM Geometrics G-816 para F. PPM Geometrics G-856 para F. QHM 55 QHM 77
1997-2001	Askania con arreglo Eschenhagen de tres componentes. Fluxgate LAMA de tres componentes Fluxgate DMI de tres componentes	PPM Geometrics G-856 para F. DI-flux RM1 para D e I.
2002	Askania con arreglo Eschenhagen de tres componentes. Fluxgate LAMA de tres componentes Fluxgate DMI de tres componentes	PPM Geometrics G-856 para F. DI-flux RM1 para D e I. DIM de la marca Zeiss THEO 020

Y las coordenadas geomagnéticas relativas a la posición del polo para el IGRF época 2000.0 son (Hernández-Ordóñez R et al., 1999):

$$\Lambda = 330.40^\circ \text{ longitud}$$

$$\Phi = 29.15^\circ \text{ latitud}$$

### 2.1.3 Vector del campo geomagnético

Al vector de inducción magnética  $B$ , se le ha denominado vector de campo geomagnético. Y al igual que cualquier vector puede ser descompuesto de acuerdo con el sistema de coordenadas, sean cartesianas, esféricas o cilíndricas.

Este vector, que afecta a cada punto  $P$ , sobre la superficie terrestre, se compone de siete elementos, dos angulares y cinco modulares (ver figura 2.1.3.1).

De las modulares,  $F$  representa el módulo del vector de inducción magnética  $B$  y debe ser llamado "intensidad total". Haciendo la descomposición de  $F$ , según tres ejes mutuamente perpendiculares (ejes cartesianos), esta contaría con una componente  $X$  en dirección sur-norte, otra en componente  $Y$  en dirección oeste-este y por último una componente  $Z$  en dirección arriba-abajo (hacia el centro de la Tierra). Finalmente, de las componentes modulares,  $H$  representa la proyección de  $F$  en el plano que forman las proyecciones  $X$  y  $Y$ , denominada "componente horizontal".

En cuanto a las componentes angulares,  $D$  es la "declinación" y representa al ángulo formado entre  $H$  y  $X$  (la dirección norte), y se mide por el ángulo que una aguja imantada en libre suspensión hace con la dirección geográfica norte-sur, pudiendo ser al oeste o al este. Este parámetro al ser el primero en definirse, adquirió una importancia histórica mayor y hoy día es la cantidad geomagnética más conocida. Finalmente  $I$  "la

inclinación", es el ángulo formado entre  $F$  y su proyección en el plano horizontal (formado por las componentes  $X$  y  $Y$ )  $H$ , y se mide positivo por debajo de este último plano.

El avance tecnológico de nuestro tiempo permite contar con equipo tan especializado, que mide una sola de estas componente o varias de ellas a la vez (Luis Muniz Barreto, 1997).

Las ecuaciones para obtener las componentes a partir de  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ , son:

Para la intensidad de la componente horizontal es:

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad 2.1.3.1$$

para la intensidad total del campo geomagnético, tendremos:

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad 2.1.3.2$$

para la inclinación magnética se tiene:

$$I = \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad 2.1.3.3$$

por convención, la inclinación es positiva cuando el vector está por debajo del plano horizontal, y negativa cuando está por encima de éste. Por último la declinación que esta definida como el azimut del meridiano magnético, positivo hacia el este y negativo hacia el oeste, queda representada por (Richard J. Blakely, 1996)

$$D = \arcsin \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad 2.1.3.4$$

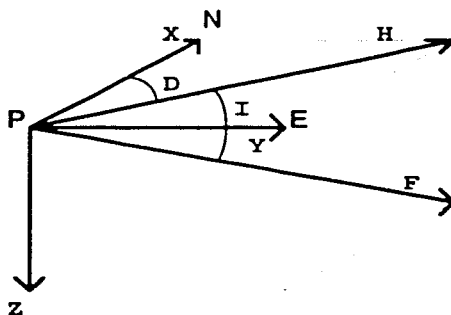


Figura 2.1.3.1. Representación gráfica del vector de campo geomagnético.

#### 2.1.4 Caracterización del campo geomagnético

Un análisis mediante armónicos esféricos nos proporciona las herramientas para la descripción de un campo potencial y sus gradientes en una esfera. Según Carl Friedrich Gauss, que en 1838 fue el primero en describir el campo geomagnético, todo el campo observado en la superficie de la Tierra es originado en su interior. Sin embargo nosotros ahora sabemos, por medio de mediciones satelitales, que una pequeña parte del campo geomagnético tiene su origen fuera de la Tierra.



Considerando la inducción magnética  $B$  y su potencial  $V$ , donde

$$\vec{B} = -\nabla V$$

y suponiendo que podemos hacer una medición de  $V$  o una de las componentes de  $B$  en una superficie esférica de radio  $a$ , se satisface la ecuación de Laplace  $\nabla^2 V = 0$ .

Si no existen fuentes fuera de la esfera tenemos que la  $V$  y la  $\frac{\partial V}{\partial r}$  tienden a cero, mientras que  $r \rightarrow \infty$ , entonces la  $V$  puede ser representada por una expansión en armónicos esféricos, como la siguiente

$$V' = a \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_n^{m'} \cos m\phi + B_n^{m'} \sin m\phi) P_n^m(\theta), \quad r \geq a \quad (2.1.4.1)$$

donde  $\theta$  es la colatitud,  $\phi$  es la longitud, el superíndice  $i$  representa el potencial,  $A_n^{m'}$  y  $B_n^{m'}$  son los coeficientes armónicos para las fuentes internas y  $P_n^m(\theta)$  es asociado a un polinomio de Legendre de grado  $n$  y orden  $m$ , normalizado de acuerdo a:

$$P_n^m(\theta) = \begin{cases} P_{n,m}, & \text{si } m=0 \\ \left[2 \frac{(n-m)!}{(n+m)!}\right]^{1/2} P_{n,m}(\theta), & \text{si } m > 0 \end{cases}$$

que es llamada la convención de Schmidt.

Por otro lado, para fuentes fuera de la superficie esférica la ecuación se tendrá así:

$$V^e = a \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{a}\right)^n \sum_{m=0}^n (A_n^{m''} \cos m\phi + B_n^{m''} \sin m\phi) P_n^m(\theta), \quad r \leq a \quad (2.1.4.2)$$

donde el superíndice  $e$  denota a las fuentes externas.

Ahora si existen fuentes tanto dentro, como fuera de la superficie de la esfera, entonces el potencial en una región libre de fuentes, cercano a la superficie de la esfera esta dado por la suma de las ecuaciones 2.1.4.1 y 2.1.4.2, esto es:

$$V = V' + V^e$$

y desarrollando

$$\begin{aligned}
 V &= a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left\{ \left[ A_n^{mi} \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} + A_n^{me} \left( \frac{r}{a} \right)^n \right] \cos m\phi \right. \\
 &\quad \left. + \left[ B_n^{mi} \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} + B_n^{me} \left( \frac{r}{a} \right)^n \right] \sin m\phi \right\} P_n^m(\theta) \\
 &= a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left\{ \left[ C_n^m \left( \frac{r}{a} \right)^n + (1 + C_n^m) \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} \right] A_n^m \cos m\phi \right. \\
 &\quad \left. + \left[ S_n^m \left( \frac{r}{a} \right)^n + (1 + S_n^m) \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} \right] B_n^m \sin m\phi \right\} P_n^m(\theta)
 \end{aligned} \tag{2.1.4.3}$$

donde

$$\begin{aligned}
 A_n^m &= A_n^{mi} + A_n^{me} \\
 B_n^m &= B_n^{mi} + B_n^{me} \\
 C_n^m &= \frac{A_n^{me}}{A_n^m} \\
 S_n^m &= \frac{B_n^{me}}{B_n^m}
 \end{aligned}$$

Los coeficientes  $C_n^m$  y  $S_n^m$  de la ecuación 2.1.4.3 son fracciones cuyo valor esta entre 0 y 1; para cada grado  $n$  y orden  $m$  dado,  $C_n^m$  y  $S_n^m$  indican la importancia relativa de las fuentes externas para el potencial total observado en la superficie de la esfera.

Ahora nuestro objetivo es determinar  $C_n^m$  y  $S_n^m$  para conocer el comportamiento de  $V$  justo en la superficie de la esfera. Esto es  $r = a$ , entonces la ecuación 2.1.4.3 queda como sigue.

$$\begin{aligned}
 V &= a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (A_n^m \cos m\phi + B_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta) \\
 &= a \sum_{n=0}^{\infty} S_n(\theta, \phi)
 \end{aligned} \tag{2.1.4.4}$$

Las mediciones de  $V$  nos permiten la determinación de  $A_n^m$  y  $B_n^m$ . Para obtener  $C_n^m$  y  $S_n^m$  es necesario conocer el cambio de  $V$  en la dirección normal a la superficie de la esfera, obteniendo el gradiente radial de  $V$ , que se expresa como

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (\alpha_n^m \cos m\phi + \beta_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta) \tag{2.1.4.5}$$

pero  $\frac{\partial V}{\partial r}$  también puede ser obtenida de la ecuación 2.1.4.3, haciendo

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n P_n^m(\theta) \left\{ [nC_n^m - (n+1)(1-C_n^m)] A_n^m \cos m\phi \right. \\ \left. + [nS_n^m - (n+1)(1-S_n^m)] B_n^m \sin m\phi \right\} \quad (2.1.4.6)$$

igualando las ecuaciones 2.1.4.5 y 2.1.4.6, tenemos que

$$\alpha_n^m = [nC_n^m - (n+1)(1-C_n^m)] A_n^m \quad (2.1.4.7)$$

$$\beta_n^m = [nS_n^m - (n+1)(1-S_n^m)] B_n^m \quad (2.1.4.8)$$

Los coeficientes  $A_n^m$  y  $B_n^m$  pueden ser obtenidos por medio de un análisis de armónicos esféricos basado en mediciones de  $V$  usando la ecuación 2.1.4.4, y los coeficientes  $\alpha_n^m$  y  $\beta_n^m$  se derivan de las mediciones de  $\frac{\partial V}{\partial r}$  utilizando la ecuación 2.1.4.5. Una vez que se han determinado esos coeficientes podemos utilizar las ecuaciones 2.1.4.7 y 2.1.4.8 para obtener  $C_n^m$  y  $S_n^m$ , que es la contribución relativa de las fuentes externas al potencial para cada armónico.

Sabemos que en los estudios geomagnéticos no es medido directamente el potencial, pero podemos establecerlo por otros caminos para así determinar los coeficientes  $A_n^m$  y  $B_n^m$ . Los magnetómetros pueden medir alguna de las componentes ortogonales de la inducción magnética. Y tomando en cuenta el sistema de referencia (figura 2.1.4.1), la relación  $B = -\nabla V$  nos lleva a las siguientes ecuaciones.

$$B_r = -B_\theta \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \quad (\text{norte}) \quad (2.1.4.9)$$

$$B_\theta = B_\phi \\ = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} \quad (\text{este}) \quad (2.1.4.10)$$

$$B_\phi = -B_r \\ = \frac{\partial V}{\partial r} \quad (\text{abajo}) \quad (2.1.4.11)$$

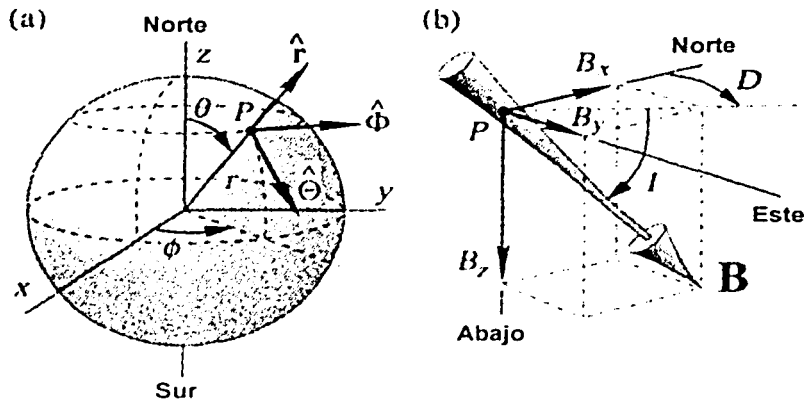


Figura 2.1.4.1 (a) Sistema de coordenadas esférico. Un punto  $P$  queda definido por coordenadas  $r$ ,  $\theta$ , y  $\phi$ , y un vector en un punto  $P$  queda descrito en términos de tres vectores unitarios ortogonales:  $\hat{r}$ ,  $\hat{\theta}$ , y  $\hat{\phi}$ . (b) Sistema de coordenadas cartesiano en un punto  $P$ . Las tres componentes del vector  $B$  son:  $B_x$  apuntando al norte ( $B_x = -B_\theta$ ),  $B_y$  al este ( $B_y = B_\phi$ ), y  $B_z$  hacia abajo ( $B_z = -B_r$ ). La inclinación  $I$  es el ángulo de  $B$  con el plano horizontal (formado por  $B_x$  y  $B_y$ ), positivo hacia abajo; la declinación  $D$  es el azimut de la proyección horizontal de  $B$ , positivo al este.

Finalmente, por la ecuación 2.1.4.5 expresa el gradiente radial de  $V$  en términos de los coeficientes  $\alpha_n^m$  y  $\beta_n^m$ , entonces

$$B_z = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (\alpha_n^m \cos m\phi + \beta_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta) \quad (2.1.4.12)$$

Y para encontrar las expresiones de  $B_x$  y  $B_y$  en términos de los coeficientes  $A_n^m$  y  $B_n^m$ , sustituimos la ecuación 2.1.4.3 en las ecuaciones 2.1.4.9 y 2.1.4.10, respectivamente y haciendo  $r = a$

$$B_x = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (A_n^m \cos m\phi + B_n^m \sin m\phi) \frac{\partial P_n^m(\theta)}{\partial \theta} \quad (2.1.4.13)$$

$$B_y = \frac{1}{\sin \theta} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (mA_n^m \sin m\phi - mB_n^m \cos m\phi) P_n^m(\theta) \quad (2.1.4.14)$$

Comúnmente en estudios geomagnéticos la ecuación 2.1.4.3 se puede representar de la siguiente forma

$$V = a \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \left( \frac{r}{a} \right)^n T_n' + \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} T_n' \right] \quad (2.1.4.15)$$

donde

$$T_n' = \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta)$$

$$T_n^r = \sum_{m=0}^n (g_n^{mr} \cos m\phi + h_n^{mr} \sin m\phi) P_n^m(\theta)$$

Y los nuevos coeficientes  $g_n^{mr}$ ,  $g_n^{m\phi}$ ,  $h_n^{mr}$  y  $h_n^{m\phi}$  son llamados coeficientes de Gauss y quedan definidos de acuerdo a los coeficientes de la expresión 2.1.4.3, quedando así:

$$\begin{aligned} g_n^{mr} &= (1 - C_n^m) A_n^m, & h_n^{mr} &= (1 - S_n^m) B_n^m, \\ g_n^{m\phi} &= C_n^m A_n^m, & h_n^{m\phi} &= S_n^m B_n^m \\ C_n^m &= \frac{g_n^{m\phi}}{g_n^{mr} + g_n^{m\phi}}, & S_n^m &= \frac{h_n^{m\phi}}{h_n^{mr} + h_n^{m\phi}} \end{aligned}$$

Ahora bien, el campo dipolar está descrito por la siguiente ecuación

$$V = a \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta) \quad (2.1.4.16)$$

si de esta ecuación excluimos el armónico  $n=1$ , lo que hacemos es eliminar el término dipolar y tenemos

$$V^N = a \sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta)$$

que es la representación del campo no-dipolar. Y en evaluaciones realizadas para cuantificar la contribución de este término, se encontró que para el norte geográfico dicha contribución es del 6.3 por ciento. Por lo que en general se dice que el campo no-dipolar comprende cerca del 10 por ciento del campo principal, así, la primera aproximación que generalmente se da del campo como un dipolo es muy buena (Richard J. Blakely, 1996).

Entonces, de una forma muy simple podemos escribir la siguiente ecuación:

$$B = B_d + B_r + B_c + B_e$$

donde

$B$ : valor del campo geomagnético medido en la superficie de la Tierra.

$B_d$ : (campo dipolar) valor de un campo magnético teórico producido por un dipolo magnético con su eje inclinado  $11.5^\circ$  con respecto al eje de rotación de la Tierra (y que no pasa exactamente por su centro). Su valor es mayor del 90% del valor de  $B$  (figura 2.1.4.2).

$B_r$ : (campo no dipolar, donde el no dipolar se refiere al dipolo principal, descrito en el párrafo anterior) valor del campo residual y puede estar asociado a varios dipolos más pequeños que el dipolo cuasi-central, que se localizan mas superficialmente (manto terrestre), en diferentes regiones del planeta.

$B_c$ : llamado campo cortical y tiene su origen en la corteza terrestre en regiones aun mas pequeñas. Se conoce usualmente como campo de anomalías.

$B_e$ : es la parte del campo medida en superficie y su variación con el tiempo es mucho más sensible que la de los demás términos. Este campo tiene su origen fuera de la Tierra, por eso es llamado también "campo externo".

De acuerdo con lo anterior se establece que:

$$B = f(\phi, \lambda, R, t)$$

Esto es que el campo geomagnético es función de la latitud  $\phi$ , de la longitud  $\lambda$ , de la distancia al centro de la Tierra  $R$  y del tiempo  $t$ .

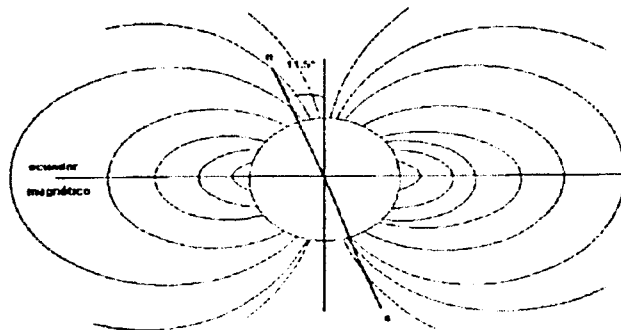


Figura 2.1.4.2 Dipolo magnético teórico.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Por último, es importante establecer las diferencias entre polos, ya sean estos, geográficos, magnéticos o geomagnéticos, para tal efecto definiremos a cada uno de ellos:

**Polos geográficos.** Son las dos intersecciones del eje instantáneo de rotación de la Tierra con su superficie. Sus posiciones no son exactamente fijas, de acuerdo con la teoría clásica de la mecánica, se desplazan algunos metros de su posición promedio en la superficie terrestre. Este fenómeno es llamado "desplazamiento de Euler".

**Polos magnéticos.** Son los dos puntos de la superficie de la Tierra en los cuales una aguja imantada es vertical o dicho más propiamente: son los puntos de la superficie terrestre en donde la inclinación magnética es  $90^\circ$ . La línea que une a estos dos puntos es el eje magnético de la Tierra.

**Polos geomagnéticos.** Son las dos intersecciones con la superficie terrestre de una línea imaginaria que puede ser asimilada al eje magnético de un dipolo definido por un modelo matemático teórico (Luis Muniz Barreto, 1997).

### 2.1.5 Variaciones temporales del campo geomagnético

Cabe mencionar que este apartado se presenta con la intención de mostrar las diferentes variaciones temporales del campo geomagnético, pero resaltaremos el hecho que, matemáticamente, la teoría presentada en éste trabajo sólo sustenta el fenómeno de un campo estacionario, esto implica que en nuestros procesos matemáticos consideraremos que el fenómeno es estacionario, ya que las variaciones de tiempo pueden considerarse nulas, esto nos lleva a simplificar los procesos matemáticos utilizados en el presente trabajo.

Como se mencionó anteriormente, podemos expresar, en forma general, el campo geomagnético así

$$B = B_n + B_r + B_i + B_s$$

Entonces las variaciones de largo periodo, que ocurren en el interior de la Tierra, y en las que pueden ser incluidas en los términos  $B_n$ ,  $B_r$  y  $B_i$ , y usando una expresión imperfecta se puede decir que éstas serían las variaciones de la "Tierra sólida". Por otra parte  $B_s$  representa las variaciones de periodo corto, que tienen su origen en las envolturas gaseosas y plasmática de la Tierra. Una idea resumida de las variaciones del campo geomagnético que se puede llamar "espectro geomagnético" se presenta en la tabla 2.1.5.1.

BANDA 1	<0.0001 – 0.3 seg. Oscilaciones de altas frecuencias
BANDA 2	0.2 – 100 seg. Micropulsaciones
BANDA 3	-1 min. – 120 min. (Sudden Storm Commencements, por sus siglas en inglés SSC) Comienzos Repentinos de Tormenta Fluctuaciones Transitorias Bahías y subtormentas
BANDA 4	6 hrs. – 15 días Sq y Variaciones Lunares
BANDA 5	2 – 27.3 días Tormentas magnéticas
BANDA 6	6 – 12 meses Variaciones estacionales
BANDA 7	10.5 – 11.5 años Variaciones con el ciclo de actividad solar
BANDA 8	-300 – 10,000 años Variaciones del campo principal
BANDA 9	1,000 – cientos millones de años Inversiones del campo geomagnético

Tabla 2.1.5.1 Variaciones temporales del campo geomagnético.

Las variaciones que están incluidas en las bandas 1 a 7 la mayoría son producidas en las capas de la atmósfera superior por la circulación de corrientes eléctricas que inducen campos en la superficie o por alteraciones en las capas más exteriores por efecto de partículas cargadas provenientes del espacio exterior. Las tormentas magnéticas constituyen perturbaciones, que presentan cuadros caóticos en el campo magnético, cuya duración puede ser muy variable y cuya amplitud puede ser muy grande, es importante hacer notar que éstas no son de carácter local, sino que se registran en toda la Tierra (ver figura 2.1.5.1).

Se han detectado variaciones hasta de 1000 nT en latitudes comprendidas entre el ecuador y los paralelos 60 al norte y al sur. Las tormentas magnéticas se reconocen en dos clases, unas, las de principio progresivo, que tienden a producirse con una frecuencia de 27 días que es el tiempo promedio de la rotación del ecuador solar; las otras como comienzos repentinos de tormenta magnética (SSC, por sus siglas en inglés), y no manifiestan alguna tendencia recurrente. En las regiones polares esta amplitud puede ser mayor. Cabe hacer hincapié en que ciertas tormentas magnéticas aparecen al mismo tiempo que las erupciones en la cromosfera del Sol.

Las llamadas bahías magnéticas son otro ejemplo de perturbación y son múltiples variaciones que se reconocen por un aumento suave del valor de la intensidad del campo hasta alcanzar un máximo, para luego disminuir, formando una "bahía" en la gráfica (Luis Muniz Barreto, 1997).

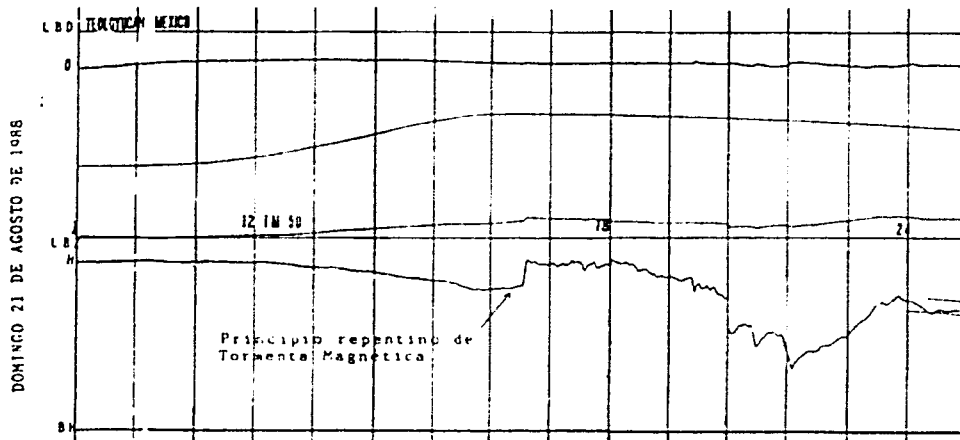


Figura 2.1.5.1 Ejemplo de una tormenta magnética registrada en el Observatorio Magnético de Teoloyucan.

### 2.1.6 Unidades de medición

Básicamente han sido dos los sistemas usados en aplicaciones geofísicas, específicamente en el geomagnetismo. Una buena parte de la literatura publicada hasta la década de 1980 empleaban el sistema de unidades cgs, aunque algunos también utilizaban el sistema de unidades electromagnéticas (emu).

Recientemente el *Système Internationale* (Sistema Internacional, abreviado como SI) ha sido utilizado con mayor frecuencia y es requerido por muchas revistas y publicaciones geofísicas.

En el sistema de unidades electromagnéticas (emu) la inducción magnética  $B$  es reportada en *gauss* (G) y la corriente tiene unidades en *abamperes*. En el Sistema Internacional (SI)  $B$  tiene unidades de *webermetro*<sup>-2</sup>, que es mejor conocido como *tesla* (T) y la corriente tiene unidades de *amperes* (1 ampere = 0.1 abampere). Para el caso de estudios geofísicos es utilizado el *gamma* en el sistema emu y el *nanotesla* en el SI, y existen las siguientes equivalencias para  $B$ :

$$\begin{aligned} 1 \text{ tesla} &= 10^4 \text{ gauss} \\ 1 \text{ nanotesla} &= 10^{-9} \text{ tesla} \\ &= 1 \text{ gamma} \\ &= 10^{-5} \text{ gauss} \end{aligned}$$

En la mayoría de los casos sabemos que la conversión es sumamente simple entre el cgs y el SI, no así para el caso del magnetismo, éste es un poco más problemático, tenemos por ejemplo que las unidades del campo de intensidad  $H$  son diferentes, tanto numérica como dimensionalmente, entre los sistemas emu y SI. Esto es debido a las diferencias en la definición de la ecuación de  $H$ ,

$$B = H + 4\pi M \quad (\text{emu})$$

$$B = \mu_0(H + M) \quad (\text{SI})$$

donde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$  (Richard J. Blakely, 1996).



## **2.2 OBSERVATORIOS MAGNÉTICOS**

Un de los objetivos de un observatorio magnético es operar por largos periodos de tiempo en un solo sitio para registrar la variación secular del campo, que es la variación observada en grandes periodos de tiempo. Para esto se considera que algunas decenas o cientos de años de medición significan relativamente un lapso corto. Por lo tanto la elección del sitio para un observatorio es de suma importancia, el cambio de las propiedades magnéticas de los alrededores tendrán que ser mínimas en el transcurso del tiempo. Es importante que el sitio del observatorio magnético sea representativo de la región para la variación secular y para las variaciones de tiempo corto.

Hay necesidades globales, regionales y locales para los observatorios magnéticos. Una tarea importante es el monitoreo de la variación secular en todo el mundo, para conocer su comportamiento en las capas exteriores de la Tierra, en donde se genera parte del campo magnético. Es necesario una red global suficientemente densa que ayude a la calibración y control de satélites para el estudio del campo geomagnético, usados en las investigaciones de éste. Una red global es esencial para monitorear las tormentas magnéticas y sus variaciones, ya que estos fenómenos afectan grandes áreas de la Tierra y tienen diferentes efectos en diferentes regiones. La red global también es necesaria para investigar los sistemas de corrientes en la ionosfera y magnetosfera y corrientes inducidas en la corteza y en el manto. Una red mucho más densa es necesaria en las zonas polares para un mejor desempeño en los estudios relacionados con fenómenos magnetosféricos. Además en las regiones ecuatoriales se requiere un buen detalle en los estudios, para analizar el comportamiento del electrojet ecuatorial (flujo eléctrico en el ecuador originado en la ionosfera).

Una aplicación típica regional para un observatorio magnético es servir como una estación base para mediciones magnéticas. Los datos desde el observatorio o preferentemente desde varios observatorios en la región son usados en reducción de datos medidos regularmente para la época deseada. El producto final de una medición magnética es usualmente una carta magnética, que es actualizada en intervalos regulares con la ayuda de las grabaciones de variación secular en los observatorios, haciendo que una nueva medición magnética detallada sea innecesaria. En algunos casos estas mediciones largas ahorran fondos. Otro uso regional es trabajando como una estación base en estudios magnetotelúricos.

Desde el punto de vista local, un observatorio magnético monitorea las variaciones magnéticas locales, proporcionando facilidades para la calibración de instrumentos magnéticos y a menudo solo sirven para obtener información sobre la declinación geomagnética local y sus cambios.

Hoy en día los observatorios producen datos en forma digital. Las nuevas técnicas en la instrumentación fueron posibles mediante la automatización de los trabajos de los observatorios, los instrumentos modernos permiten, si su uso es apropiado, un incremento en las aproximaciones absolutas. Esto es importante, ya que las investigaciones magnéticas globales por satélites necesitaran datos de los observatorios.

Los métodos de medición magnética absoluta tuvieron cambios durante los últimos 20 años. La introducción del magnetómetro de protón y los teodolitos no magnéticos con sensores fluxgate, perfeccionaron la adquisición de datos y hacen posible la operación para cualquier persona con un apropiado entrenamiento.

20 años atrás la adquisición de datos era mucho más compleja, requería de destreza especial y mucho entrenamiento.

Algunos de los instrumentos de grabación son estables y permiten una reducción del número de mediciones absolutas. Algunos otros métodos para controlar la estabilidad pueden ser aplicados en algunos otros casos. Aunque no serán reemplazadas las mediciones absolutas reales, ya que éstas serán de gran utilidad.

La red global de observatorios magnéticos permite el estudio físico de algunos fenómenos dentro y fuera de la Tierra. Algunos observatorios tienen requerimientos especiales cuando se intentan construir dentro de ciudades, pero estos son necesarios.

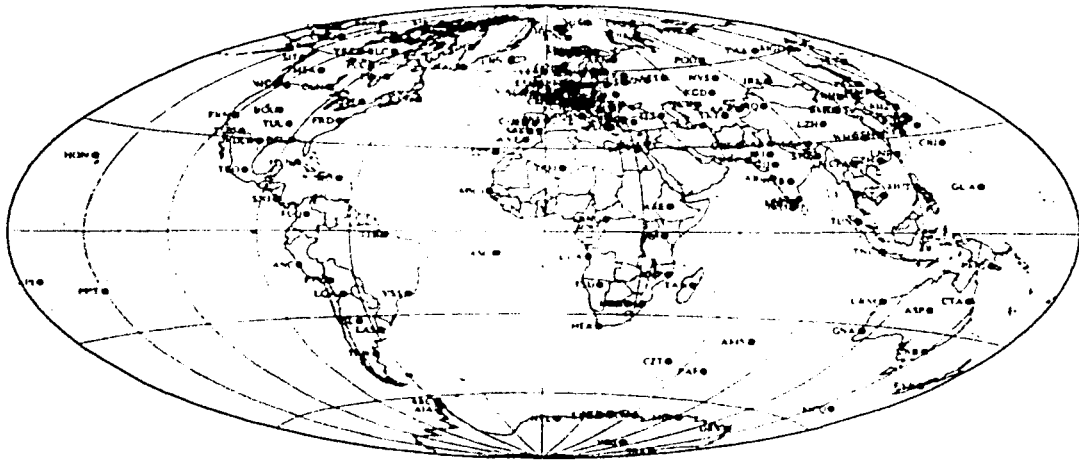


Figura 2.2.1 Observatorios magnéticos permanentes en operación para 1994.

(Jankowski y Suchsdorff, 1996).

Las mediciones requieren de destreza por parte de los observadores que trabajan durante largos periodos de tiempo. En algunos casos es solo cuestión de presionar un botón o de transmitir los datos colectados a la memoria de la computadora. Todo esto se da por la automatización de las estaciones, supervisado raramente por técnicos. Esto es para instrumentos instalados con una finalidad de propósitos especiales, tales como en los estudios de inducción o de sistemas de corrientes en la ionosfera. Para el caso de producción de datos magnéticos reales de la variación secular, donde la variación de esta deberá ser de algunos nanoteslas, se requiere de personal capacitado, el cual deberá hacer las mediciones con la mayor calidad posible. Así, la dificultad hoy en día no son las mediciones absolutas, sino contar con personal competente para juzgar las correcciones de los datos producidos y tomar acción si surge algún problema. Esto no es posible sin el continuo monitoreo de los datos. Usando redes electrónicas modernas, el monitoreo puede ser centralizado para varios observatorios, pero es mejor tener un observador en el sitio para asegurar una mejor calidad de los datos (Jankowski y Suchsdorff, 1996).

## 2.2.1 Construcciones para el observatorio

Se requieren de tres condiciones principales para alojar a los variómetros modernos:

- Un pilar estable para el sensor,
- Temperatura estable ( la temperatura típica para un variómetro fluxgate es de  $1 \text{ nT}^{\circ}\text{C}$ ), y
- No utilizar materiales magnéticos en la construcción.

Usualmente los cuartos de los observatorios Magnéticos clásicos cumplen con esos requerimientos. Los sensores modernos en la actualidad son pequeños y raramente requieren de mantenimiento, aunado a que la electrónica, por lo regular, no necesita ser ajustada después de su instalación. Entonces con esto podemos sustituir las grandes construcciones antiguas por cuartos mucho más pequeños o hasta es posible colocarlos en cajas adecuadas cumpliendo con las condiciones mencionadas, resulta obvio que estas nuevas construcciones pueden ser hacerse dentro de las construcciones grandes.

Usando instrumentos modernos, las mediciones absolutas pueden realizarse cerca de los instrumentos de grabación, la distancia entre la casa de mediciones absolutas y el cuarto de variómetros puede ser menor a 30 metros si los instrumentos provocan pequeñas perturbaciones del campo. Si se usa un magnetómetro de protón, el campo magnético de la bobina de compensación puede causar disturbios tranquilos cuando los instrumentos se encuentran retirados, dependiendo de la construcción de la bobina.

Las figuras 2.2.1.1 y 2.2.1.2 son ejemplos de las distribuciones con las que puede contar un observatorio Magnético.

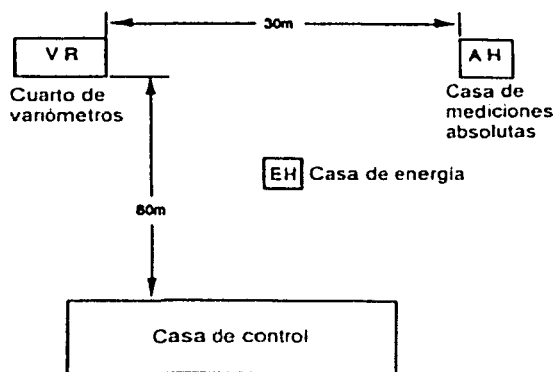


Figura 2.2.1.1. Ejemplo del arreglo de un observatorio magnético, las distancias entre las casas son medidas mínimas, pero pueden variar dependiendo de los instrumentos en uso (Jankowski y Suchsdorff, 1996).

Como se muestra en la figura 2.2.1.1, es recomendable que la separación entre las casa o cuartos sean las mostradas para un observatorio completo. Un factor sumamente importante es contar con suministro de energía sin interrupción, para esto debemos contar con el un banco de baterías que deben encontrarse en la casa de energía, estas baterías también pueden ser instaladas en la casa de control. La electricidad proporcionada por las baterías es un respaldo de energía ya que los variómetros deben funcionar conectados a una toma de corriente eléctrica, las baterías son recargadas continuamente con la conexión a la corriente eléctrica y en casos especiales son recargadas por celdas solares, estas deben funcionar en el caso de que el suministro de energía eléctrica se suspenda por algún motivo. En algunos casos el banco de baterías funciona como amortiguador para el suministro de energía hacia los variómetros. Preferentemente el lugar en donde se

instalan las baterías deberá contar una temperatura estable. En algunos casos, la electrónica para los magnetómetros fluxgate (preamplificadores) es poco magnética pero debe mantenerse alejado de los variómetros (1 m o un poco menos, aunque esto tendrá que ser probado). En este caso, la electrónica podrá estar en una temperatura estable dentro del cuarto de los variómetros.

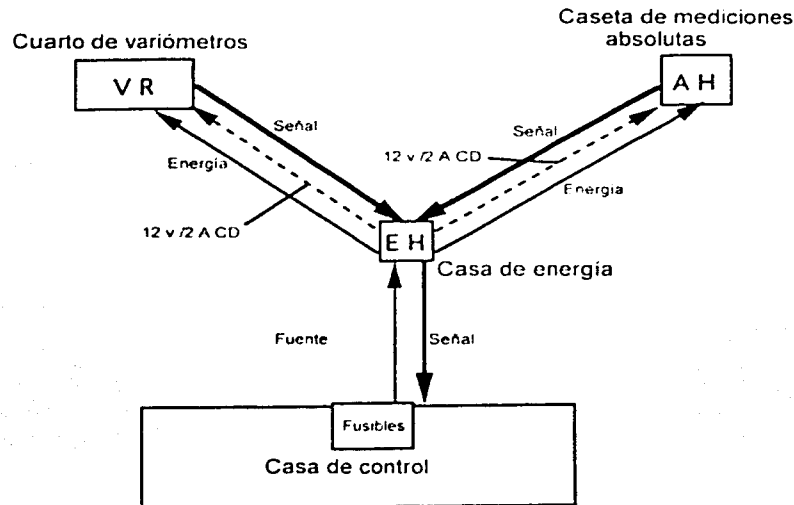


Figura 2.2.1.2 Ejemplo de un observatorio magnético (Jankowski y Suchsdorff, 1996).

La distancia entre los sensores y la casa de energía debe ser separadas aproximadamente 15 metros y la separación de la caseta de mediciones absolutas y la casa de energía debe ser similar, en donde su función es la distribución de energía y señales, como se muestra en la figura 2.2.1.2.

La construcción de un cuarto moderno para los variómetros, contiene diferencias notables comparándolo con uno clásico: el observador tenía que realizar visitas diarias al cuarto de los variómetros, mientras que los variómetros modernos solo necesitan poco servicio después de la instalación. Sin embargo, los pilares para los sensores modernos tienen que ser muy estables. Se recomienda la estabilización de la temperatura para el sensor o en su totalidad el cuarto de variómetros, en donde la temperatura será grabada. Esto se ve en la figura 2.2.1.3.

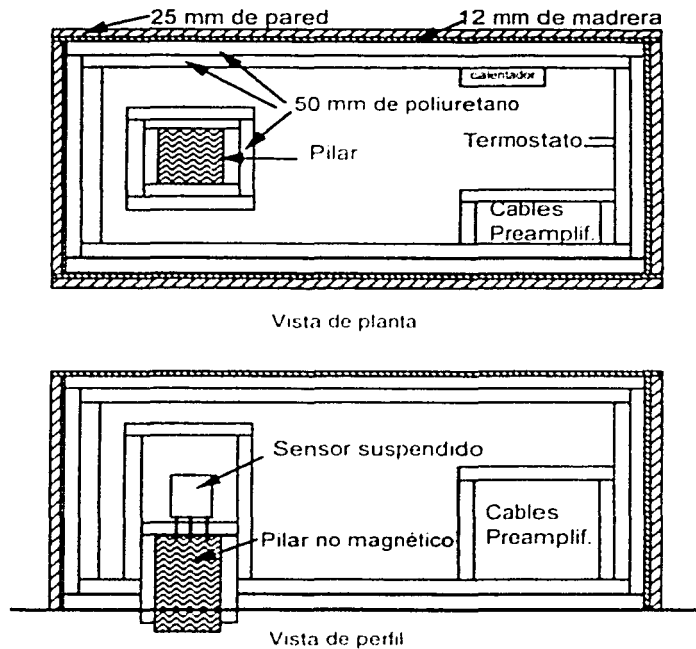


Figura 2.2.1.3. Ejemplo de una instalación con calefacción para variómetros. Este tipo de caja es usada exitosamente en observatorios magnéticos canadienses, en la parte superior se muestra la vista en planta y en la parte inferior se muestra la vista de perfil (Jankowski y Suchsdorff, 1996).

En las casas de valores absolutos antiguas, era necesario de grandes pilares. Ahora las casas de valor absoluto pueden ser construidas mucho más pequeñas, dependiendo de la instrumentación. En algunos casos un pilar es suficiente cuando los instrumentos no tienen que ser calibrados. Para esto no es necesario contar con una temperatura estable en la casa de mediciones absolutas, pero de ser posible debe mantenerse la casa a temperatura normal. Los pilares para las medidas absolutas deben ser absolutamente no magnéticos, pero esa estabilidad no es tan crítica como lo es para los variómetros.

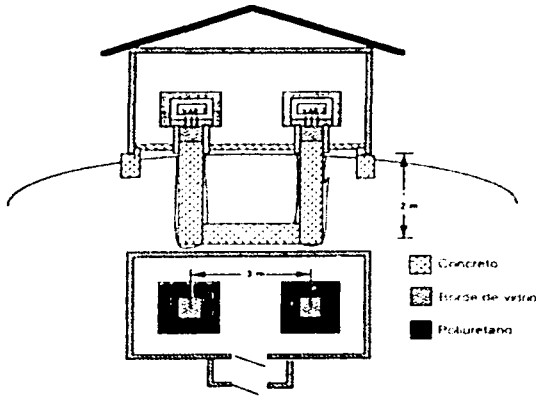


Figura 2.2.1.4

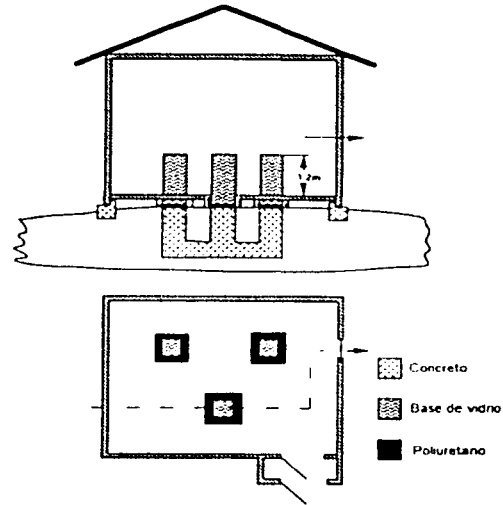


Figura 2.2.1.5

(Jankowski y Suchsdorff, 1996).

Desde el punto de vista económico no es posible cumplir con todas las necesidades, y la casa de mediciones absolutas podrá hacerse muy pequeña de ser requerida. Puede solamente ser requerida una casa con un pilar si los instrumentos que normalmente se usan no necesitan pilares separados. Si son dos pilares en el cuarto de los variómetros, tendrán que construirse sobre una base estable (como se muestra en la figura 2.2.1.4 y 2.2.1.5). Cuando un magnetómetro de protón es usado, solo se necesitara un pilar aislado. La construcción final depende mucho de las condiciones locales. A continuación se muestran unos puntos importantes que se deben tomar en cuenta para la planeación.

1) Los pilares en el cuarto de variómetros deben ser estables. Esto es bueno si se coloca sobre una roca firme, pero esto es raro. Por lo tanto, el pilar debe colocarse con una profundidad considerable para que las inclemencias del tiempo o el agua de lluvia no afecten la construcción. En la práctica se recomienda que se encuentre a dos metros debajo del nivel del piso, es aconsejable consultar a las autoridades locales de construcción. El agua de lluvia es un problema común por lo tanto el agua debiera correr alrededor de los pilares, pueden ser colocados tubos alrededor o por debajo de los pilares para que el agua sea drenada. El piso debe ser separado de los pilares utilizando un material ligero. En algunas áreas es imposible la construcción de pilares estables y se requiere otro tipo de soluciones, como suspender los sensores.

2) La temperatura deberá ser controlada con una variación de 0.5 °C durante todo el día, esto importante en el cuarto de variómetros o en la caja de los variómetros (según sea el caso) adicionado a los sistemas de compensación para los efectos de temperatura de los variómetros, para lograr esto se necesita aislar el cuarto de los variómetros o las cajas que contengan a los sensores para atenuar las variaciones de la temperatura para hacer posible las correcciones por efecto de temperatura en el tratamiento final para que los datos sean más exactos. Esto es factible si la energía eléctrica está disponible, con esto se mantendrá constante la temperatura de las cajas o de todo el cuarto. Si el aislamiento es bueno, la energía requerida, en

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

la práctica, el consumo será de unas decenas de watts, dependiendo del clima y el aislamiento de las cajas. Un buen método para mantener la temperatura es tener a los sensores abrigados y enterrados, para este aislamiento se podrá realizar con láminas de aluminio que son no magnéticas. Un ejemplo de un sistema no magnético se muestra en la figura 2.2.1.3.

La electrónica puede tener coeficientes de temperatura, algunas veces del orden de  $1 \text{ nT}^\circ\text{C}$ . En ocasiones la electrónica debe mantenerse con un entorno de temperatura estabilizada. Naturalmente, la temperatura de los variómetros y de la electrónica debe ser probada antes de instalar los instrumentos. La temperatura de los variómetros deberá ser monitoreada junto con los datos de campo magnético. Esto es recomendable para controlar la temperatura del cuarto de variómetros.

En los climas cálidos, los rayos del sol son un problema, pintando de blanco las instalaciones ayuda para reflejar el calor y el enterrar los instrumentos sera la mejor solución, si las condiciones lo permiten.

3) Todos los materiales que encierran a los sensores deberán ser no magnéticos. En la práctica los materiales de las paredes tendrán que ser probadas: concreto (tendrá que ser usado cemento blanco, y la arena tendrá que ser probada), ladrillos, partes metálicas como las bisagras, cerraduras, termostatos, calentadores eléctricos, apagadores, enchufes, clavijas y el cubrimiento del techo. Probando estos materiales será más fácil el uso del teodolito fluxgate, normalmente usado para las mediciones absolutas. El concreto puede ser probado haciendo un pequeño bloque y probandolo con el fluxgate, para el sensor del cuarto es suficiente unos 0.5 m. alejado del sensor si los materiales nos dan menor a 1 nT. En la casa de mediciones absolutas los requerimientos son mayores. La limpieza habitual de los pilares es especialmente importante. Usualmente los pilares de la casa de mediciones absolutas están hechos a nivel de piso y la parte superior estará hecha de algún material no magnetico previamente probado como madera, ladrillos de vidrio o de caliza.

Otras consideraciones adicionales que se deben tomar en cuenta en la construcción de un nuevo observatorio es que el lugar en donde se encontrará instalado este libre de vandalismo. Deberá contar con una continua supervisión, esto es contradictorio para la construcción de un observatorio ya que para evitar el vandalismo se requiere de construcciones firmes y costosas.

La casa de mediciones absolutas deberá contar con dos pilares para dos instrumentos de ser posible; muy a menudo el personal del observatorio realizará pruebas a los instrumentos y hará mediciones especiales.

Es importante, por recomendación de la IAGA, instalar un pilar como referencia fuera de la casa de mediciones absolutas y preferentemente dos o mas en diferentes direcciones de la construcción. La distancia hacia la casa de mediciones absolutas deberá tener como distancia mínima 50 m. La diferencia de los elementos de campo entre esos pilares y el pilar de la casa de mediciones absolutas tendrán que ser medidas regularmente, aproximadamente cada año, si llegasen a existir cambios tendrán que realizarse una investigación.

Los pilares de la casa de mediciones absolutas tendrán una visión libre para observar el azimut de la marca, preferentemente unos cientos de metros o de ser posible mas. La dirección geográfica de la marca del azimut es determinada realizando mediciones de Sol o estrellas. Si no es posible observar el Sol o las estrellas directamente desde el pilar de mediciones absolutas, la dirección de la marca del azimut podrá ser determinada haciendo mediciones de Sol exactamente sobre el pilar de la línea de marca del azimut, para esto

solo se necesita un teodolito. Las observaciones de Sol pueden hacerse desde cualquier lugar con una visión clara del teodolito sobre el pilar de mediciones absolutas (a través de la puerta o de la ventana). En este caso serán necesarios dos teodolitos: la dirección geográfica desde el teodolito que se encuentra afuera hacia el teodolito sobre el pilar que es determinado por las observaciones de Sol, y la dirección geográfica desde el teodolito que se encuentra adentro hacia el teodolito que se encuentra afuera que es la localización inversa. Las lecturas serán muy exactas de teodolito a teodolito si se logran visualizar las ópticas de estos, de esta forma, el cálculo de la dirección del azimut será mucho más fácil.

En el caso de que la marca del azimut sea vista a través de una ventana, contendrá un error en la dirección aparente para la marca causada por la refracción. El posible efecto de la ventana podrá ser determinado realizando observaciones con la venta abierta y cerrada en condiciones climáticas tranquilas. Para tener iluminación en el lugar se necesita contar con materiales no magnéticos y a una altura considerable, aproximadamente a 1 m del fluxgate. La lámpara deberá estar colocada exactamente sobre el teodolito para tener una mejor visión. (Si la lámpara se encuentra muy cercana al teodolito provocará una sombra).

Si la marca del azimut se encuentra a una distancia mayor 100 m, considerando que es la distancia mínima entre el pilar de la casa de mediciones absolutas y la marca, un desplazamiento perpendicular de 1 cm con respecto al azimut de la marca, medirá 0.3 minutos de arco. Por lo tanto, tendrán que ser fijadas unas ranuras en la parte superior del pilar para la base del teodolito, esta base puede ser de diferente tamaño, exactamente sobre en la misma marca sobre el pilar de observaciones absolutas (Figura 2.2.1.6). Una marca deficiente del azimut puede ser una fuente de error en las mediciones de declinación  $D$ . En la figura 2.2.1.6 (derecha) muestra una marca de azimut que se encontró dando buenos resultados (Jankowski y Suchsdorff, 1996).

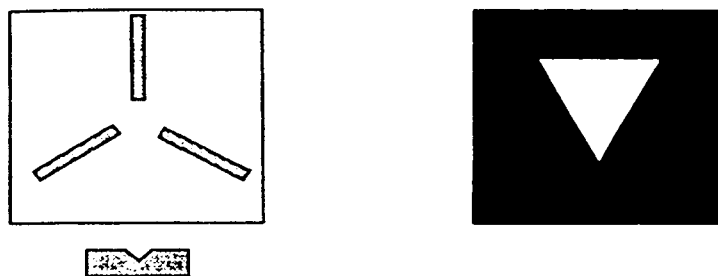


Figura 2.2.1.6 Izquierda: Las ranuras de cobre o de aluminio en la parte superior del pilar de la casa de mediciones absolutas; abajo una sección transversal de las ranuras. Los ángulos entre las ranuras deben tener  $120^\circ$ , esta es la base en donde se coloca el teodolito. Derecha: Una conveniente marca del azimut para una observación segura. El tamaño de la marca deberá ser parecido a la línea vertical del telescopio del teodolito sin cubrir el triangulo blanco, esta marca es la que se encuentra a una distancia mayor de 100 m. del pilar de la casa de mediciones absolutas (Jankowski y Suchsdorff, 1996).



### **2.2.2 Evitando interrupción en la grabación de datos**

En los observatorios magnéticos, la operación continua es muy importante. Por lo tanto, todas las mediciones deben hacerse evitando interrupciones en la grabación de los datos. Una causa de la interrupción de las grabaciones es la energía eléctrica. Por lo que se recomienda que todos los sistemas deben ser respaldados por medio de baterías. La duración de las interrupciones de energía dependen de las condiciones locales. Las fallas durante el día son posibles en cualquier momento, entonces las baterías deben estar listas para entrar en funcionamiento en cualquier momento.

La falla del equipo es otra causa por la cual podemos tener interrupción en la serie de datos. Usualmente la ayuda de un técnico no es inmediata cuando las fallas no son detectadas apropiadamente. Para mantener la grabación continua, en el observatorio podría correr un sistema secundario. Esto no es una solución costeaible, especialmente si el sistema viejo es remplazado por un equipo moderno. A menudo es posible mantener el sistema viejo funcionando cuando el sistema principal falle. De cualquier forma, ambos sistemas serán comparados en intervalos regulares para asegurar el funcionamiento de ambos sistemas y para mantener la grabación sobre el nivel absoluto así que en caso de que falle el sistema principal el sistema secundario puede ser usado para rellenar los huecos.

En algunas partes del mundo, la humedad puede crear problemas, a pesar que los instrumentos nuevos no son tan sensibles a la humedad como los clásicos. Para reducir el efecto, se debe contar con una buena ventilación en las construcciones del observatorio. La electrónica puede ser especialmente tratada para los efectos de humedad. En algunos lugares, las partes y los cables tienen que ser protegidos contra insectos de animales pequeños. Los equipos modernos de adquisición de datos cuentan con unidades de almacenamiento, como son los discos flexibles o discos duros, que pueden ser un poco sensibles al polvo.

La casa principal de un observatorio puede tener diferentes funciones dependiendo del nivel de automatización. Los instrumentos para el mantenimiento del observatorio pueden permanecer en este sitio. En la casa principal también puede residir algún trabajador del observatorio y podrá contar con cuartos para visitantes (Jankowski y Suchsdorff, 1996).

### **2.2.3 Algunos consejos prácticos**

Algunas precauciones son necesarias para la construcción de un observatorio. Los materiales de acero como son los clavos no tendrán que ser abandonados en la construcción, todas las herramientas tendrán que ser guardadas después de ser utilizadas, es común que las herramientas se olviden durante la construcción, el acero no debe ser abandonado en cualquier parte de la construcción, ya que estos materiales tendrán efectos magnéticos. El aluminio puede ser usado en lugar del acero en el concreto.

No se permiten los cables de corriente en el área del observatorio. En los periodos de perturbaciones magnéticas, las corrientes pueden ser inducidas en este, produciendo campos magnéticos que distorsionan las grabaciones. Por ejemplo, el alto voltaje de las líneas de corriente alterna, corrientes directas de orden de 10 A. son grabadas durante tormentas magnéticas. El efecto magnético de una línea de corriente de 10 A. a una distancia de 1000 m es de 2 nT, como se ve en la ley de Biot-Savart el cual nos dice que la inducción magnética de una línea larga de corriente es:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$$

donde  $\mu_0$  es la permeabilidad del espacio libre ( $= 4\pi \cdot 10^{-7}$  henry por metro),  $i$  es la corriente en amperes [A],  $r$  es la distancia en metros [m], y  $B$  es la inducción magnética en teslas [T].

Algunas observaciones son malas debido a los objetos metálicos que trae consigo el observador o que se encuentran cercanas al lugar de la observación o de la grabación. Los artículos peligrosos para las observaciones son: herramientas, instrumentos electrónicos, automóviles, bicicletas, etc. Los anteojos son especialmente indeseados para las observaciones absolutas, porque son usados muy cercanos al magnetómetro. En algunas ocasiones las reparaciones dentales provocan disturbios en las mediciones.

En una distancia  $r$  la amplitud de la anomalía es  $(r_i / r)^3$ , donde  $r_i$  es la distancia mencionada en la tabla 2.2.3.1, en dos casos, a saber cuando la magnetización permanente es más grande que la magnetización inducida, o cuando es mayor comparándola con la distancia del punto de medición, estos valores pueden hacerse pequeños durante la observación. La mejor forma para evitar problemas causados por objetos magnéticos es realizar mediciones de efecto magnético a un rango muy corto como en la distancia que

es requerido para conocer el disturbio del campo y se usa la formula  $\left(\frac{r_i}{r}\right)^3$  para calcular el efecto. De

cualquier forma, el efecto de objetos muy grandes puede disminuir solo con  $\frac{r_i}{r}$ .

Objeto	$r_i$ [m]
Clavo	1
Hebilla	1
Reloj	1
Pluma metálica	1
Navaja	2
Desarmador	2
Revolver	3
Martillo	4
Pala	5
Rifle	7
Bicicleta	7
Motocicleta	20
Automóvil	40
Camión	80

Los objetos de la tabla producen 1 nT cuando se encuentran a la distancia  $r_i$  respectiva (Jankowski y Suchsdorff, 1996).

Tabla 2.2.3.1

En pruebas de efecto magnético de un cuerpo puede realizarse acercándolo a un magnetómetro lentamente, especialmente si esta hecho de un buen conductor como el aluminio o cobre, moviendo el objeto en el campo geomagnético induce corrientes en el objeto que se verán en el magnetómetro como variaciones del campo magnético (Jankowski y Suchsdorff, 1996).

### **2.3 CONDICIONES GEOFÍSICAS**

Las propiedades del área del observatorio planeado deben ser objeto de un estudio muy cuidadoso. Si los mapas magnéticos son confiables, nos proporcionaran información importante de la homogeneidad magnética de sitio en donde se pretende construir el observatorio magnético. En adición, se deberá hacer un estudio de la superficie del lugar. Esto es fácil de realizar con dos magnetómetros de protón, uno como referencia de la variación temporal del campo y el otro que será utilizado para el estudio del sitio en donde se pretende instalar el observatorio. En el área de estudio en donde se planea la instalación, se deben realizar mediciones en forma de malla con una distancia entre los puntos de 10 metros entre cada uno o de ser posible con una menor distancia. Si no se cuenta con cartas aeromagnéticas, se tendrá que realizar un estudio con una malla de algunos kilómetros para el observatorio. Las anomalías grandes (cientos de nT) no serán aceptables para el sitio del observatorio, el área del observatorio, de ser posible, no deberán existir diferencias entre los puntos a cada 10 metros, tan solo de algunos nT. En particular, para las mediciones absolutas el sitio del observatorio deberá presentar gradiente (horizontal y vertical) menores a 5 nT/m, de ser posible 1 nT/m.

Hay también otra posible causa para que los datos no sean representativos para un observatorio magnético, el efecto de corrientes inducidas en la Tierra para el sitio del observatorio hace mucho más difícil su finalidad; las grabaciones magnéticas de las perturbaciones del observatorio y las que se encuentran alrededor del observatorio, son grabadas simultáneamente y se requiere de un buen estudio para observar el efecto. En la mayor parte de los observatorios magnéticos del mundo tal estudio no fue realizado. Esto es entendible, porque el uso satisfactorio de instrumentos portátiles para la grabación fue posible hasta años recientes. Es recomendable que los observatorios no se encuentren cercanos a la costa, con una distancia no menor 10 Km, esto debido a la alta conductividad del agua de mar, obteniendo que las variaciones del campo geomagnético en estas estaciones sean diferentes a las variaciones observadas en tierra adentro. Por lo tanto, en las observaciones marinas no se recomienda usarlas como base.

Además de las propiedades del área del observatorio, algunos otros factores también tienen que ser tomados en cuenta, por ejemplo, los observatorios deben ser instalados en lugares lejanos a la civilización y esto es un factor no favorable para el personal capacitado. De esta forma el observatorio debe encontrarse lejos de disturbios humanos. Estas actividades son difícil predecirlas para futuras décadas y mucho más para algunos cientos de años, pero se intenta, en cualquier caso, se debe reservar un área con un radio de 300 metros para la casa de mediciones absolutas y alejado por lo menos 1 Km de las vías del tren. Si las vías son eléctricas, la distancia deberá ser mucho mayor, y en el caso de trenes con corriente directa deberá tener decenas de kilómetros de distancia, dependiendo de la conductividad del terreno (Jankowski y Suchsdorff, 1996).

1. Las condiciones necesarias para el sitio del observatorio son:

- a) Que los elementos geomagnéticos sean "normales", esto es que las mediciones del campo geomagnético en el observatorio no sean distorsionadas por anomalías causadas por cuerpos geológicos magnetizados anormalmente.
- b) Que el subsuelo de los alrededores del área sea medianamente homogéneo en conductividad eléctrica. Es recomendable una estratificación horizontal del subsuelo que satisfaga estas condiciones y como ya se mencionó, que el observatorio se encuentre alejado a 10 kilómetros de la costa.

2. Para cumplir con el primer requerimiento, será necesario llevar a cabo la exploración magnética pertinente, y así asegurar que los elementos tengan una distribución normal (en superficie) en los alrededores del observatorio. Para esto, se tendrán que realizar levantamientos en líneas que tengan como centro el sitio del observatorio, serán cuatro, dos extensiones de 60 kilómetros en las direcciones N-S y W-E, y otras dos con extensión de 30 kilómetros en direcciones NE-SW. En dichos levantamientos la componente que se tendrá que medir es F y las estaciones serán cada 3 kilómetros. Los valores vistos en una gráfica contra distancia nos darán aproximadamente una línea recta, pero inclinada, si no se cuenta con otro instrumento para hacer la corrección por variación diurna las observaciones no podrán ser corregidas y la línea mostrará una modulación debido a la variación diurna. El sitio será excelente si las anomalías son menores a 50 nT. Las anomalías tendrán que ser evitadas si son mayores a 200 nT.

3. El espaciamiento para el levantamiento tendrá que realizarse cada 10 metros, realizando una malla de 100 x 100 metros. Para la corrección por variación diurna es suficiente realizar una medición en el punto central del terreno con un intervalo de muestreo de 30 minutos. Seleccionando el área con un gradiente menor para la casa de mediciones absolutas. Si en las cuatro esquinas de la casa de mediciones absolutas la diferencia es menor a 5 nT entonces podremos considerarla como el sitio perfecto. Los gradientes grandes pueden ser tolerados en condiciones excepcionales. Con gradientes de más de 10 nT por metro el magnetómetro de protón fallará y nos dará lecturas no confiables. Si los gradientes grandes están presentes en los instrumentos de medición absoluta deberán siempre ocupar la misma posición. Ocasionalmente, es difícil encontrar un sitio con una búsqueda extensiva.

4. En la fase inicial del observatorio, es difícil lograr el segundo requerimiento. Particularmente, la homogeneidad de la conductividad eléctrica de la tierra es la que cumple o no con esto. La investigación de la conductividad del subsuelo necesitará para operaciones simultáneas de varios magnetómetros portátiles en orden para también investigar o no trascendentes como bahías y tormentas magnéticas son grabadas con una amplitud y una fase por encima del área apreciable. Un sustituto para esta investigación puede ser un estudio cuidadoso de toda la información geológica relacionada a las posibles deformaciones de los estratos como fallas y pliegues.

5. Fuentes de disturbios artificiales del campo geomagnético son vías con corriente eléctrica de corriente directa y vías de tranvías, los ferrocarriles se deben encontrar a unos 20 Km si tienen líneas de

corriente. Las subestaciones de corriente eléctrica y las estaciones de señales de UHF también son causa de perturbaciones en el campo geomagnético.

6. Cuando se selecciona un sitio para el observatorio, se deben cubrir varios aspectos generales. Un buen camino para el sitio y un adecuado abastecimiento de agua, estos son requerimientos mínimos. La electricidad no es absolutamente necesaria porque puede ser suplida de otra manera. El transporte público puede ser un beneficio para los residentes del observatorio.

El desarrollo urbano es otro factor importante para la planeación del observatorio, ya que esto puede crecer y tendrá que ser cambiado de sitio el observatorio, también debe contarse con protección de autoridades para que el observatorio no sufra de disturbios sociales o de actividades en sus alrededores que pueden causar datos erróneos y hasta interrumpir las actividades del observatorio. La fase inicial puede ser favorable pero al tratar de conseguir lo anterior puede ser que no sea factible (Wienert, 1970).

## **2.4 INSTRUMENTACIÓN Y OPERACIÓN**

La historia del geomagnetismo reconoce un gran número de instrumentos, empezando desde brújulas antiguas e inclinómetros hasta instrumentos modernos que se utilizan en la actualidad. El detalle de la descripción y de la teoría de los instrumentos se encuentra en los libros de geomagnetismo y también en los manuales de los observatorios magnéticos, en este apartado se describirán algunos instrumentos importantes para la medición del campo geomagnético.

Desde el punto de vista geofísico, el campo geomagnético presenta algunas características interesantes por ejemplo, es un laboratorio natural permanente, y para realizar una medición, se debe hacer un gran esfuerzo para lograr observaciones libres de ruido. Debido a su gran extensión espacial con respecto a los sensores que utilizamos para medirlo, es un campo que se mide puntualmente. Este campo cambia constantemente y quien realiza la medición no puede detener su evolución en el tiempo. Los fenómenos que tienen lugar en el núcleo del planeta, en la magnetosfera, y en la ionosfera, así como las corrientes inducidas, contribuyen al valor observado en una simple medición del campo. También las condiciones dinámicas en su dirección, y magnitud hacen que solamente las técnicas de análisis de frecuencias nos permitan identificar algunas de estas fuentes que contribuyeron a nuestra medición.

En toda la superficie de la Tierra, el campo por suave que sea, es muy fuerte comparado con los campos de variaciones rápidas relativamente infinitesimales. Los sensores de los magnetómetros requieren un rango dinámico extremadamente amplio y que va desde  $10^{-1}$  hasta  $10^4$  nT, lo que representa dificultades para confinar observaciones en determinados rangos de frecuencias de alguna clase particular de fenómeno geomagnético que deseamos medir.

No se ha alcanzado el límite en la elaboración de instrumentos cada vez más sensibles al campo geomagnético. Cada paso que se da para conseguir mayor resolución trae consigo nuevos problemas de diseño. Para nuestra fortuna, existe una variedad de fenómenos físicos que responden a los campos

magnéticos y los sensores respectivos que se han producido, tienen cada uno sus ventajas y desventajas (Hernández-Quintero, 2002).

#### **2.4.1 Magnetómetros de bobina de inducción**

Este instrumento consta básicamente en  $N$  espiras de cable. Un voltaje  $V$ , es inducido uniformemente por un campo magnético variable  $B$ ; el cambio del flujo magnético  $\Phi$  que pasa a través de las espiras se obtiene de:

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

En donde  $\Phi$  es la componente normal (perpendicular al área de la espira) de  $B$  sumada sobre el área  $A$  (en metros cuadrados) de esta espira. Si consideramos un campo que oscila con una frecuencia  $f$  y amplitud  $B_0$ , entonces:

$$|V| = 2\pi f N A B_0$$

en donde  $|V|$  es la magnitud del voltaje de salida de la  $n$ -ésima espira de área  $A$ .

Las variaciones normales del campo geomagnético más rápidas que 0.003 ciclos por segundo generalmente presentan amplitudes menores conforme la frecuencia se ve aumentada. Sin embargo la última ecuación nos dice que la respuesta de las espiras de la antena se incrementa proporcionalmente a la frecuencia. Los dos rasgos se compensan de tal manera que las bobinas de inducción son muy utilizadas para trabajar con micropulsaciones geomagnéticas. En estos dispositivos aparecen usualmente restricciones debidas a la amplitud de la señal a estudiar, por lo cual, se restringe su uso sólo a señales con periodos menores que algunos minutos.

Algunas bobinas de inducción involucran un núcleo ferromagnético sobre el cual va montado un devanado. Las dimensiones relativas de la forma del núcleo y los devanados compensadores junto con la composición del núcleo, determinan la permeabilidad efectiva. El incremento en el voltaje de respuesta de la antena es proporcional a la permeabilidad efectiva del material del núcleo. Sin embargo, el material ferromagnético puede introducir algunos problemas, principalmente asociados con la naturaleza de la curva de histéresis. La medición del campo que se desea obtener no puede separarse de la frecuencia natural del campo geomagnético (más alta) o de otras radiaciones electromagnéticas hechas por el hombre, influyendo en la medición antes de que se combinen los campos dentro del material del núcleo de alta permeabilidad. En ciertos casos, estos campos extraños pueden mover el rango de operación hacia la parte no lineal de la curva de histéresis, resultando componentes indeseables de distorsión en la señal geomagnética (Campbell, 1997).

Las antenas de inducción se fabrican con la respuesta de resonancia natural sobre la frecuencia más alta deseable de operación. Tales antenas tienen en el rango de detección una amplitud lineal y una respuesta en fase. La respuesta de la antena es limitada debido a ruidos intrínsecos resistivos, e influyen en las amplitudes bajas. Una forma circular provee un área máxima y un mínimo de cable para el devanado. Una antena típica de 2 m de diámetro y 16,000 vueltas de un cable de cobre de 0.127 mm de diámetro tiene una frecuencia natural de resonancia de alrededor de 140 ciclos por segundo y produce 0.3  $\mu\text{V}$  para una señal de

1 miliTesla (mT) a un ciclo por segundo. Las antenas de núcleo comúnmente tienen un rodillo de alta permeabilidad con diámetros de 2.5 cm, longitudes de aproximadamente 2 m, y 20,000 o más vueltas en el devanado. Con tales sistemas la respuesta a 1 mT a un ciclo por segundo deberá estar alrededor de 0.1 mV.

El uso de los magnetómetros de inducción está limitado a situaciones que involucran frecuencias mayores relacionadas con el campo geomagnético. El principal inconveniente en su uso es el tamaño y el peso para transportarse (Hernández-Quintero, 2002).

#### **2.4.2 Magnetómetros Fluxgate (Núcleo de saturación)**

Los magnetómetros fluxgate fueron introducidos en la década de los años 30. Sus primeras aplicaciones estuvieron encaminadas al reconocimiento aéreo y a la detección de submarinos durante la II Guerra Mundial. Posteriormente fueron desarrollados para estudios geomagnéticos (mediciones aéreas, marítimas y submarinas), prospección minera y más adelante para mediciones en el espacio exterior.

Con el inicio de la era espacial en la década de los años 50, el magnetómetro fluxgate es adaptado a las mediciones en el espacio exterior y es utilizado en varios vehículos espaciales para mapear el campo geomagnético, el campo magnético de la Luna, y los campos planetarios e interplanetarios. Tiene además un amplio campo de uso en otras áreas de la geofísica. En un observatorio geomagnético en tierra se tiene una variación de  $\pm 500$  nT sobre una base promedio de 60000 nT. La frecuencia de respuesta y nivel de ruido son típicamente de 1 Hz por debajo de 1 nT. Mientras que un instrumento en el espacio posee una ventana de 500 Hz con variaciones que van de decenas de picoTeslas hasta algunas decenas de nanoTeslas.

La ecuación básica del Fluxgate está expresada en términos del factor de demagnetización  $D$ , el número de espiras que tiene el núcleo  $n$ , el área de la sección del núcleo  $A$ , así como de la permeabilidad relativa  $\mu_r$ , el campo geomagnético  $B_{ext}$  ( $B$  externo) que dará como resultado un voltaje de salida  $V_{sec}$ :

$$V_{sec} = nAB_{ext}(1-D) \left[ \frac{d\mu_r}{dt} + D(\mu_r - 1) \right]$$

En instrumentos de este tipo, la no-linealidad de la magnetización de aleaciones ferromagnéticas de alta permeabilidad provee un indicador de la intensidad del campo local. La palabra "fluxgate" se aplica típicamente a estos magnetómetros y se refiere al método de interrupciones periódicas (gate) del flujo magnético en el detector (Campbell, 1997).

El "núcleo de saturación" es un material altamente permeable que se utiliza para amplificar el campo magnético obtenido en una antena que se parece mucho más a una antena de un magnetómetro de bobina de inducción tal como el que se describió anteriormente.

La diferencia entre la bobina de inducción y el sensor del magnetómetro fluxgate no está solamente en el tamaño de los embobinados sino también en sus respectivos ciclos de saturación o histéresis; ya que en el fluxgate se cuenta con un campo oscilatorio de compensación llamado "offset" para hacer simétricas las variaciones positivas y negativas del campo medido, propiedad con la que no se cuenta en el sensor de la bobina de inducción.

El elemento sensitivo de un magnetómetro fluxgate entonces consiste de un núcleo saturable hecho de un material de alta permeabilidad. Alrededor del núcleo hay dos bobinas: una de excitación, y otra de recolección. Si una corriente de excitación con frecuencia  $f$  ( $\omega = 2\pi f$ ) alimenta a la bobina de excitación de tal manera que se verifique la saturación y si existe un campo externo a lo largo del sensor del fluxgate, existirá en la bobina de recolección una señal de salida con una frecuencia  $f$  y además otros armónicos que son particularmente sensibles a la intensidad del campo.

En la actualidad se utilizan diferentes configuraciones para el campo de excitación; sensores paralelos u ortogonales al eje de las bobinas con muchas formas de onda en la señal de excitación (Primdahl, 1979). Supongamos que una curva de histéresis se puede aproximar por un polinomio de tercer grado:

$$B = aH^3 + cH$$

En el sensor del fluxgate, el campo magnético consiste del campo externo  $H_0$  y el campo de excitación  $H_1 \cos \omega t$ , teniendo para  $B$ :

$$B = a(H_0 + H_1 \cos \omega t)^3 + c(H_0 + H_1 \cos \omega t)$$

Desarrollando la expresión:

$$B = aH_0^3 + cH_0 + \frac{3}{2}aH_0H_1^2 + \left( \frac{3}{4}aH_0H_1^3 + 3aH_0^2H_1 + cH_1 \right) \cos \omega t + \frac{3}{2}aH_0H_1^2 \cos 2\omega t + \frac{1}{4}aH_1^3 \cos 3\omega t$$

En esta expresión se observa que hay un segundo armónico en el término  $(\cos 2\omega t)$  en la señal de salida y una amplitud proporcional a  $H_0$ . Sin embargo es importante hacer notar que en estas expresiones se muestra el principio de funcionamiento muy simplificado. El tratamiento formal es más complejo.

En la Figura 2.4.2.1 se ilustra la forma de onda de un sensor fluxgate de una sola barra. En ausencia de campo externo, la señal de salida será simétrica y alrededor de los puntos  $(\omega t = 0, \pi, 2\pi, \dots)$  etc. Por lo cuál no existen armónicos impares. En el caso de la existencia de un campo externo adicional, el núcleo se satura más fácilmente durante una excitación de medio ciclo, y más tarde durante el correspondiente medio ciclo. Teniendo en este caso armónicos impares en la señal de salida con amplitudes proporcionales al campo externo. En un sensor con doble núcleo, las bobinas de excitación están conectadas en serie y son excitadas en direcciones opuestas (o en antifase); así se acentúan los armónicos impares en el voltaje inducido sobre la bobina recolectora, además de que hay una cancelación de los armónicos fundamentales y pares. Los sensores con núcleo circular pueden tratarse como una generalización de los sensores de núcleo doble además de que las formas de onda en la señal de excitación son similares.



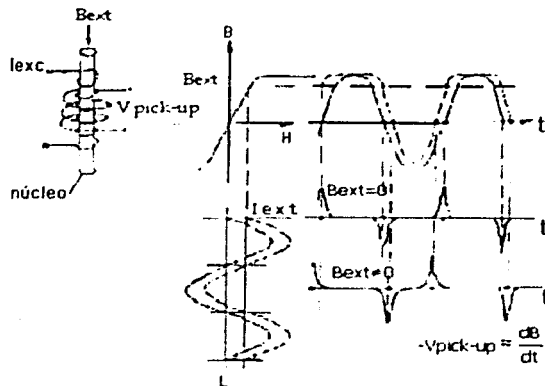


Figura 2.4.2.1 Representación de la forma de onda de un sensor fluxgate de una sola barra (Jankowski y Suchsdorf, 1996).

La mayoría de los magnetómetros usan un sistema de retroalimentación (feed-back), en el cuál el sensor del fluxgate es un indicador de campo nulo. Para este caso hay dos aplicaciones principales. El campo es compensado por la corriente de retroalimentación, o por otro lado la mayor parte del campo se compensa por una corriente de desviación que viene de una fuente de energía independiente y solamente el resto del campo es compensado por la corriente de retroalimentación o feed-back.

En un magnetómetro fluxgate común, la excitación del sensor se produce por un oscilador. La señal que genera la bobina retroalimentadora es amplificada con un amplificador sintonizado alimentando un detector sensible a la fase, tomando como referencia al segundo armónico de la frecuencia de excitación. Una corriente proporcional al voltaje de salida alimenta a la bobina de retroalimentación del sensor para oponerse al campo detectado por el sensor. Debido a la gran amplificación y a la retroalimentación, la estabilidad y linealidad del magnetómetro son altas y dependientes de los cambios de los parámetros de la bobina de retroalimentación, especialmente en su impedancia y las constantes propias de ésta.

Existen magnetómetros fluxgate sin campo independiente de compensación, lo que significa que la componente total de campo magnético está compensada por las corrientes de retroalimentación. Estos magnetómetros se utilizan para registrar no solamente variaciones de campo, sino también para medir su intensidad. Para una resolución de 0.1 nT se requieren 20 bits en el convertidor analógico digital. Esta clase de construcción presenta algunos problemas para estabilizar el campo compensador o feedback. Algunos parámetros del magnetómetro se pueden corregir por medio de electrónica o mecánica adicional. En ocasiones la compensación por temperatura se hace de manera electrónica. Actualmente es posible realizar correcciones digitalmente, ya que la mayoría de los nuevos magnetómetros tienen microprocesadores y por regla la temperatura es registrada también junto con los datos magnéticos. Sin embargo, es importante guardar los datos resultantes crudos antes de hacer cualquier corrección. Los magnetómetros fluxgate han sido construidos para muchos y muy diferentes objetivos y sería muy complicado listar sus parámetros técnicos. El último diseño típico de un magnetómetro fluxgate posee una resolución de 0.1 nT (para

investigaciones en el espacio exterior los hay hasta con 0.01 nT) y un ancho de banda típico de 5 Hz (Hernández-Quintero, 2002).

### **2.4.3 Magnetómetro de precesión protónica (PPM)**

La física de un magnetómetro de protón se describe usualmente en términos clásicos más que en términos más detallados de la mecánica cuántica. Un protón es un átomo de hidrógeno despojado de su electrón orbital. En un fluido rico en hidrógeno, los protones no están ligados a una red cristalina. Podemos considerar que el protón (el núcleo del átomo de hidrógeno) es una carga esférica que rota y que posee un momento magnético inherente,  $m_p$ , y un momentum angular del spin  $I_p$ . La razón entre estas dos cantidades vectoriales es llamada razón giromagnética escalar,  $\gamma_p$ :

$$\gamma_p = \frac{m_p}{I_p} (\gamma / s^2)$$

Un campo magnético externo  $H = \frac{B}{\mu_0}$  inducirá un torque en el spin del protón para alinear su

momento magnético y causar una precesión en los ejes del spin. El proceso entero es mucho más familiar si recordamos el cabeceo de un trompo cuando se está deteniendo. El cabeceo (precesión) del trompo es debido a la interacción de las fuerzas giroscópicas y gravitacionales, el ritmo de cabeceo del trompo cambia con su velocidad de giro (spin) ya que la fuerza gravitacional es constante. Para el trompo, la fricción en el punto de contacto con el suelo retarda su spin, deteniendo así la frecuencia de precesión en cuanto el trompo va deteniéndose. Para el protón, la velocidad angular del spin es una constante atómica, es la fuerza del campo magnético al que cambia. No hay fricción para el protón girando, sólo un cabeceo generalizado de su orientación en el tiempo debido a las colisiones entre las moléculas que contienen a los protones.

La frecuencia angular del protón en precesión,  $\omega_p$ , llamada la frecuencia de Larmor, es igual al producto de la razón giromagnética y la magnitud del campo total:

$$\omega_p = 2\pi f_p = \gamma_p H$$

De esta manera, conociendo la razón giromagnética, la intensidad del campo magnético es medida por la frecuencia  $f_p$  de la precesión. En la representación más detallada de la teoría de la mecánica cuántica  $\omega_p$  es la rotación cuántica a nivel atómico que representa el estado de energía que cambia a niveles menores en la presencia de un campo magnético.

En una muestra de material rica en hidrógeno los protones están orientados al azar de tal manera que la precesión de los núcleos debido al campo externo, no puede ser detectada por una bobina de inducción en la vecindad de la muestra. Sin embargo si la muestra primero se sujeta a un campo magnético muy fuerte a un determinado ángulo con el campo exterior  $H_0$  (el cual será medido) el acoplamiento de los momentos magnéticos exhibirán un cierto grado de alineamiento. Entonces si el campo polarizante es abruptamente reducido, en un tiempo mucho menor que la frecuencia de Larmor, y a un valor considerablemente menor que

$H_0$  los protones precesarán al unísono alrededor de  $H_0$ , induciendo una señal en la bobina de recolección. A veces la bobina polarizadora se utiliza como recolectora, conectándola a un filtro pasabanda apropiado así como a un amplificador.

En un sensor simple, la amplitud de la señal depende de la orientación del magnetómetro y es proporcional a  $\sin^2 \theta$  (donde  $\theta$  es el ángulo entre el eje de la bobina polarizadora y la dirección del campo). Recientemente, se han utilizado bobinas toroidales alrededor de sensores en forma de dona. Para este arreglo la máxima señal de salida es sólo la mitad de este valor cuando el campo se alinea perpendicularmente al eje del sensor.

Fluidos ricos en hidrógeno, tal como el agua, alcohol, aceites, y keroseno han sido usado en el sensor. En un sensor cilíndrico de agua de 300 a 500  $\text{cm}^3$ , un campo polarizante de 1 a 4  $\times 10^7$   $\gamma$  aplicado durante 2 a 5 segundos resultan en una señal detectable del orden de microvolts en una bobina de cable muy fino de 500 a 1000 vueltas. La razón protónica generalmente adoptada es de 0.26751525  $(\text{nT s})^{-1}$ . En la superficie de la Tierra en donde los campos más grandes varían entre 3 y 7  $\times 10^4$  nT las frecuencias están entre 1.2 a 2.0  $\times 10^3$  c/s.

Una variante del magnetómetro de precesión protónica es aquella que usa una propiedad conocida como el efecto Overhauser. La adición de sales al sensor causa que la energía del spin en algunos electrones sea transferida a los protones en campos de alta energía. Esto permite que la frecuencia precesional del protón sea continuamente medida.

La sensibilidad de un magnetómetro de protón típico está limitada por la precisión de la determinación de la razón giromagnética, la integración temporal del contador de frecuencias, la duración de la señal detectable, y el gradiente del campo por medio del núcleo. Se puede obtener fácilmente una precisión del orden de 1 nT o hasta 0.05 nT con el uso de sistemas especiales (Hernández-Quintero, 2002).

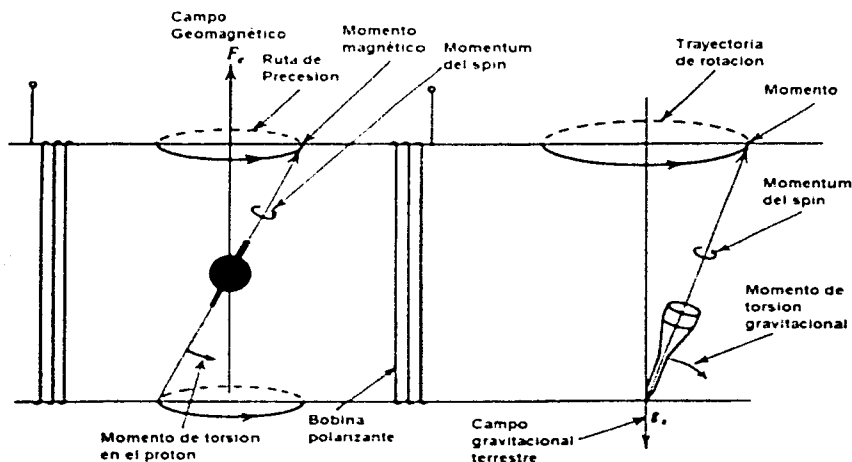


Figura 2.4.3.1 Principio de precesión protónica, en analogía con el caso gravitacional terrestre. (Modificada de W. M. Telford, L. P. Geldart and R. E. Sheriff, 1990).

#### **2.4.4 Magnetómetro de bombeo óptico**

Estos magnetómetros son similares a los de protón y se diferencian en que a los átomos se les imprime un momento magnético que es posible medirse. Sin embargo, en este sistema óptico este momento se obtiene usando ciertas características únicas en los niveles de energía y de las leyes selección cuántica para electrones críticos de algunos gases sobre la absorción y re-emisión de energía en forma de luz. Un campo oscilatorio en la frecuencia adecuada dará a los átomos una coherencia en sus momentos magnéticos cuya frecuencia de Larmor (una medida del campo magnético) es determinada por la absorción de luz selectivamente.

El proceso es muy complicado dado el hecho de que no existe una relación lineal entre la magnitud del campo magnético y la separación altamente fina de los niveles de energía. Adicionalmente, la modulación de la frecuencia, involucra la precesión de muchos estados en los subniveles de energía que pueden promediar valores de 4.66737 c/s por nT en las mediciones de campo ambiental. En los últimos años se han desarrollado magnetómetros más precisos en una "sola línea" de Rubidio, con lo cual se ha alcanzado un sólo estado del subnivel de energía que deseamos conocer.

En los magnetómetros de Rubidio se tiene una sensibilidad límite de alrededor de 0.2 nT. El magnetómetro mide el campo total y las variaciones a lo largo de la dirección del campo total. Este magnetómetro tiene un sistema de bobinas grandes y mutuamente perpendiculares para producir un campo con tendencia para calibrar las componentes vectoriales del campo total. Las ventajas de este tipo de instrumentación es que operan muy bien en campos magnéticos débiles y tienen un tiempo de respuesta rápido, lo que les ha dado un lugar para montarlos a bordo de satélites. Si estos se utilizan en observatorios, tienen la desventaja de su vida operativa limitada en cuanto a la absorción de las celdas, así como lo complicado de su electrónica.

El Helio también se utiliza en los magnetómetros de bombeo óptico. En un campo eléctrico débil estos átomos pueden ser excitados a un estado meta-estable en radiofrecuencias que tiene una vida relativamente mayor y estable en subniveles de energía menores para una mejor sensibilidad al campo magnético ambiental. La sensibilidad comercial que alcanzan estos dispositivos, alcanza los 0.01 nT (Hernández-Quintero, 2002).

#### **2.4.5 Magnetómetros basados en el efecto Zeeman.**

Zeeman descubrió que en un campo magnético muy intenso, una línea del espectro atómico se separa en tres líneas. La separación es una medida de la magnitud del campo. Visto desde ángulos rectos al campo, la línea media (posición original) es polarizada en una dirección paralela al campo, y en donde las dos líneas simétricas exteriores son polarizadas perpendicularmente al mismo. Paralelamente al campo, sólo las dos componentes más externas pueden ser vistas. Estas dos líneas son polarizadas de manera circular, en direcciones opuestas, con su sentido determinado por la dirección del campo magnético aplicado.

La detección de campos magnéticos utilizando el efecto Zeeman se restringe sólo a campos muy intensos. Es muy efectivo para regiones en donde los átomos emiten espectros de ondas relativamente largas y con cierto ángulo de fase. Por ejemplo es muy efectivo para el brillo de líneas de FeI (ioduro de hierro) cerca

de los 5250.216 Å para las emisiones detectadas en la Tierra provenientes de la superficie solar. El magnetómetro que se utiliza para estos objetivos depende principalmente de la habilidad de separación de las líneas del espectro. Un separador de haces de luz hace que las líneas oscilen entre dos fotomultiplicadores que están contruidos especialmente para que detecten mejor las líneas que se encuentran más separadas. La diferencia de amplitud de los fotómetros se convierte en una medición del campo magnético original en el lugar de la emisión del FeI. Los magnetómetros de efecto Zeeman han hecho posible el estudio del campo magnético del Sol con sensibilidades de alrededor de  $10^4$  nT.

Tipo de Magnetómetro	Principio de funcionamiento	Resolución (nT)	Utilidades y/o Aplicaciones
Variómetro clásico	Imán suspendido por una fibra de cuarzo, en ocasiones se utiliza su periodo de oscilación para obtener B $B = \frac{\mu_0 I}{M} \left( \frac{2\pi}{l} \right)^2$	$10^4$	En la actualidad se utilizan en países de tercer mundo que poseen observatorios magnéticos, es típicamente poco sensible, respuesta muy pobre a las pulsaciones geomagnéticas. Su diseño simple es adecuado para presupuestos bajos.
Magnetómetro de Presesión Protónica (ppm)	Utiliza la propiedad de razón geomagnética escalar y por medio de la frecuencia de Larmor se obtiene el campo $\omega_p = 2\pi f_p = \gamma_p H$ , donde $\gamma$ es $\gamma_p = \frac{m_p}{I_p}$	$10^4$	Ideal para la medición de campo total, pobre respuesta a micro-pulsaciones, es un instrumento de calibración en un observatorio magnético, se utiliza extensamente en levantamientos magnéticos de exploración.
Antena de Inducción	La ley de Faraday rige este instrumento, variando el flujo magnético en el tiempo $V = -N \frac{d\Phi}{dt}$	$10^4$ en Hz	Mide el ritmo de cambio del campo, es pobre su respuesta en señales con periodos mayores a un minuto, se utiliza en algunos satélites piráticos. Ideal para medición de micropulsaciones.
Sonda para Corrientes Telúricas	Las ecuaciones de Maxwell nos da una razón entre los campos a medir por medio de $\vec{E}_s = \mu \frac{2\pi f}{\sigma}$	$10^3$ en Hz	Es muy útil en sondeos geológicos, así como en mediciones de micropulsaciones, de construcción simple, pero tiene dificultades para calibrarse.
Spinner	El voltaje de medición se relaciona directamente con B $V = 2\pi f N A B_0$	$10^3$ nT/cm <sup>2</sup> en 1 Hz	Es utilizado para especímenes paleomagnéticos con buenos resultados, presenta problemas de ruido de fondo debido a la rotación y a cargas electrostáticas.
Fluxgate	La ecuación básica del fluxgate es un voltaje que depende de las propiedades del material, y el factor de demagnetización D $V_{CG} = nAB_s \frac{dI_s}{dt} \left[ \frac{1 + D(\mu_r - 1)}{1 + D(\mu_r - 1)} \right]^2$	$10^3$	Es utilizado en observatorios geomagnéticos modernos, en satélites que miden campos magnéticos débiles, es sensible a los esfuerzos mecánicos y a la temperatura, precisa de calibrarse con un magnetómetro ppm existe una modalidad de bajo ruido para micropulsaciones.
Bamboo óptico	Utiliza ciertas características de la mecánica cuántica que dan a los electrones de algunos tipos de gases el mismo efecto que en el ppm, a diferencia que la frecuencia se determina por la absorción de la luz que estas hacen.	$10^3$	Mediciones de campo geomagnético total, usado comúnmente en satélites, con un diseño electrónico muy complejo, tiene una respuesta rápida y un amplio rango de frecuencias de medición.
Efecto Zeeman	Utiliza la propiedad del espectro atómico sometido a campos magnéticos intensos cuyas líneas se separan proporcionalmente al campo aplicado (efecto Zeeman).	$10^4$	Se utiliza solo para campos muy intensos en el sol, por ejemplo.
Superconducción Criogénica (SQUID)	Aprovecha propiedades macroscópicas de conductores sometidos a temperaturas criogénicas, los cuales expulsan su campo magnético y se aprovecha la modificación de la conductancia del material para obtener un voltaje de salida.	$10^3$	Se usa extensamente en estudios Paleomagnéticos, con una electrónica compleja, presenta problemas de fugas por la evaporación del helio que utiliza.

Tabla 2.4.5.1 Comparación de magnetómetros utilizados en la actualidad (aumentada de Campbell, 1997).

En la Tabla 2.4.5.1 se presentan de manera resumida los magnetómetros usados en la actualidad. Se mencionan los objetivos, principales características teóricas, resolución, y aplicaciones. Además de los descritos se presentan otros tipos que son utilizados en la actualidad (Hernández-Quintero, 2002).

### **3. METODOLOGÍA**

En este capítulo se describen los métodos utilizados para realizar el procesamiento de los datos de los terrenos prospectados, para seleccionar el terreno en donde se instalará el observatorio magnético. Los procesos utilizados en el análisis de datos son los siguientes:

- a) Corrección por Variación Diurna.
- b) Reducción al Polo.
- c) Gradiente horizontal.

A continuación se describen los procesos utilizados.

#### **3.1 CORRECCIÓN POR VARIACIÓN DIURNA**

Al aplicar el método magnético se pretende obtener variaciones del campo geomagnético en un punto sobre la superficie de la Tierra. Generalmente las mediciones magnéticas se realizan a lo largo de perfiles en estaciones de observación equiespaciadas. Combinando los perfiles se obtiene un mapa de observaciones magnéticas. El campo geomagnético sufre variaciones con respecto al tiempo, como la variación diurna. Estas variaciones, que no están relacionadas con los depósitos geológicos del área, se superponen a los valores medidos, por esto se deben corregir los valores registrados. La variación diurna es producida por corrientes inducidas en la ionosfera y se corrige repitiendo la medición de la variación de intensidad total en una estación base en intervalos de tiempo regulares desde el principio hasta el final de la campaña de medición. Los valores medidos en la estación de base se representan en función del tiempo, que permite calcular el valor de corrección correspondiente a cada medición en una observación del levantamiento magnético mediante una sencilla sustracción (Geometrics Inc., 1995).

La corrección por variación diurna es una sustracción del campo total (que es medido en el área seleccionada con el magnetómetro móvil) y la lectura de una estación base.

El sentido físico de la corrección por variación diurna es obtener la contribución cortical del campo geomagnético, eliminando la parte dipolar (campo principal o *main field*), la parte del campo producida por fuentes externas y a cada instante de medición las variaciones temporales.

#### **3.2 REDUCCIÓN AL POLO**

En la geofísica aplicada, la interpretación de los resultados asume dos diferentes aspectos, El primero es un análisis detallado de los datos obtenidos por cada uno de los métodos aplicados. El segundo es la síntesis de los datos geofísicos y geológicos. El primero es concerniente solo a geofísica.

La reducción al polo puede ser considerada como un complemento de otros métodos. Es básico en la interpretación de datos aeromagnéticos, las anomalías, pueden estar dispersas en los mapas de campo total, para una mejor visualización recurrimos a la reducción al polo, esto es posible solo para grabaciones continuas.

La reducción al polo consiste en llevar nuestros datos de cualquier latitud de la Tierra en donde la inclinación del campo geomagnético es diferente de 90 grados, al polo magnético en donde esta inclinación será de 90 grados.

Esta transformación cambia las anomalías como si estuvieran magnetizadas verticalmente. La reducción al polo asume que las rocas en el área de investigación están magnetizadas paralelamente al campo geomagnético.

Para realizar la reducción al polo, es necesario utilizar la Transformada de Fourier para el caso de perfiles geomagnéticos, y para el caso de superficies se requiere el uso de la Transformada de Fourier en dos dimensiones.

La ecuación que representa la componente del campo magnético anómalo en cualquier punto  $z < 0$  es la siguiente.

$$F(x, y, z) = -\frac{z}{2\pi} \iint \frac{F(x', y', 0) dx' dy'}{\left[ (x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2 \right]^{3/2}} \quad (3.2.1)$$

para la reducción al polo de la ecuación 3.2.1 debemos tomar en cuenta que si un cuerpo permeable se encuentra en el Polo Magnético, se magnetizará en dirección vertical.

$$A^* = -M \cdot \nabla \int \frac{dv}{R} = -M \frac{\delta}{\delta z} \int \frac{dv}{R} \quad (3.2.2)$$

Donde la componente total  $F^*$  existirá sólo en la vertical, es decir

$$\Delta T^* = -\frac{\delta A^*}{\delta z} \quad (3.2.3)$$

en cualquier otra latitud sería

$$\Delta F = r_u \cdot \nabla A \quad (3.2.4)$$

donde  $r_u$  es el vector unitario en la dirección del campo magnético terrestre

$$r_u = \cos I \cos D \hat{i} + \cos I \sin D \hat{j} + \sin I \hat{k} \quad (3.2.5)$$

$I$ : inclinación del campo magnético terrestre.

$D$ : declinación del campo magnético terrestre.

Entonces:

$$\Delta T = r_u \cdot \nabla \phi = \left( \cos I \cos D \frac{\delta}{\delta x} + \cos I \sin D \frac{\delta}{\delta y} + \sin I \frac{\delta}{\delta z} \right) A \quad (3.2.6)$$

tomando la derivada vertical

$$\frac{\delta \Delta T}{\delta z} = \left( \cos I \cos D \frac{\delta}{\delta x} + \cos I \sin D \frac{\delta}{\delta y} + \sin I \frac{\delta}{\delta z} \right) \frac{\delta A}{\delta z} \quad (3.2.7)$$

aplicando la Transformada de Fourier ya que  $\phi$  y  $F$  son funciones armónicas se obtiene

$$\mathfrak{F} \left\{ \frac{\delta \Delta T}{\delta z} \right\} = \left( ip \cos I \cos D + iq \cos I \sin D + (p^2 + q^2 \sin I) \right) \mathfrak{F} \left\{ \frac{\delta A}{\delta z} \right\} \quad (3.2.8)$$

por lo tanto

$$\frac{\delta A}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta z} \left( -M \cdot \nabla \int \frac{dv}{R} \right) = -M \cdot \nabla \frac{\delta}{\delta z} \int \frac{dv}{R} = (\bar{m}_u \cdot \nabla) M \frac{\delta}{\delta z} \int \frac{dv}{R} \quad (3.2.9)$$

donde  $\bar{m}_u$  es el vector unitario en la dirección del vector de magnetización

$$\bar{m}_u = \cos i \cos d \bar{i} + \cos i \sin d \bar{j} + \sin i \bar{k} \quad (3.2.10)$$

y

$$\bar{m}_u \cdot \nabla = \cos i \cos d \frac{\delta}{\delta x} + \cos i \sin d \frac{\delta}{\delta y} + \sin i \frac{\delta}{\delta z} \quad (3.2.11)$$

por lo tanto

$$\frac{\delta A}{\delta z} = \left( \cos i \cos d \frac{\delta}{\delta x} + \cos i \sin d \frac{\delta}{\delta y} + \sin i \frac{\delta}{\delta z} \right) M \frac{\delta}{\delta z} \int \frac{dv}{R} \quad (3.2.12)$$

pero

$$M \frac{\delta}{\delta z} \int \frac{dv}{R} = A^* \quad (3.2.13)$$

entonces

$$\frac{\delta A}{\delta z} = \left( \cos i \cos d \frac{\delta}{\delta x} + \cos i \sin d \frac{\delta}{\delta y} + \sin i \frac{\delta}{\delta z} \right) A^* \quad (3.2.14)$$

y su Transformada de Fourier es

$$\mathfrak{F} \left\{ \frac{\delta A}{\delta z} \right\} = - \left( ip \cos i \cos d + iq \cos i \sin d + \sqrt{p^2 + q^2} \sin i \right) \mathfrak{F} \{ A^* \} \quad (3.2.15)$$

sustituyendo en 3.2.8 se tiene

$$\mathfrak{F} \left\{ \frac{\delta \Delta T}{\delta z} \right\} = - \left( ip \cos I \cos D + iq \cos I \sin D + \sqrt{p^2 + q^2} \sin I \right) \left( ip \cos i \cos d + iq \cos i \sin d + \sqrt{p^2 + q^2} \sin i \right) \mathfrak{F} \{ A^* \} \quad (3.2.16)$$

despejando

$$\mathfrak{F} \{ A^* \} = \frac{- \mathfrak{F} \left\{ \frac{\delta \Delta T}{\delta z} \right\}}{\left( ip \cos I \cos D + iq \cos I \sin D + \sqrt{p^2 + q^2} \sin I \right) \left( ip \cos i \cos d + iq \cos i \sin d + \sqrt{p^2 + q^2} \sin i \right)} \quad (3.2.17)$$

donde la Transformada de Fourier de  $\frac{\delta \Delta T}{\delta z}$  sería

$$\mathfrak{F} \{ \Delta T(x, y, z) \} = \mathfrak{F} \{ \Delta T(x, y, 0) \} e^{-p^2 \cdot z} \quad \text{y} \quad \mathfrak{F} \left\{ \frac{\delta \Delta T(x, y, z)}{\delta z} \right\} = \sqrt{p^2 + q^2} \mathfrak{F} \{ \Delta T(x, y, 0) \} e^{-\sqrt{p^2 + q^2} \cdot z} \quad (3.2.18)$$

entonces

$$\mathfrak{F} \{ A^* \} = \frac{- \sqrt{p^2 + q^2} \mathfrak{F} \{ \Delta T(x, y, 0) \} e^{-\sqrt{p^2 + q^2} \cdot z}}{\left( ip \cos I \cos D + iq \cos I \sin D + \sqrt{p^2 + q^2} \sin I \right) \left( ip \cos i \cos d + iq \cos i \sin d + \sqrt{p^2 + q^2} \sin i \right)} \quad (3.2.19)$$



y si  $\Delta T^* = \frac{\delta}{\delta z} A^*$  entonces  $\mathfrak{I}\{\Delta T^*\} = -\mathfrak{I}\left\{\frac{\delta}{\delta z} A^*\right\} = -\sqrt{p^2 + q^2} \mathfrak{I}\{A^*\}$  sustituyendo queda finalmente

$$\mathfrak{I}\{\Delta T^*\} = \frac{(p^2 + q^2) \mathfrak{I}\{\Delta T(x, y, 0)\} e^{-\sqrt{p^2 + q^2} z}}{(ip \cos I \cos D + iq \cos I \sin D + \sqrt{p^2 + q^2} \sin I)(ip \cos i \cos d + iq \cos i \sin d + \sqrt{p^2 + q^2} \sin i)} \quad (3.2.20)$$

obtenemos la expresión de la Reducción al Polo en las frecuencias. Donde  $\Delta T(x, y, 0)$  son los valores de campo total anómalo en  $z=0$ .

Si consideramos los valores de inclinación ( $i$ ) y declinación ( $d$ ) del vector  $M$  de magnetización son iguales a la inclinación ( $I$ ) y Declinación ( $D$ ) del campo terrestre entonces se convierte a

$$\mathfrak{I}\{\Delta T^*\} = \frac{(p^2 + q^2) \mathfrak{I}\{\Delta T(x, y, 0)\} e^{-\sqrt{p^2 + q^2} z}}{(ip \cos I \cos D + iq \cos I \sin D + \sqrt{p^2 + q^2} \sin I)} \quad (3.2.21)$$

donde el filtro de reducción al polo (ver figura 3.4.3.1) es  $F_{KIP}(p, q, z)$

$$F_{KIP}(p, q, z) = \frac{(p^2 + q^2) e^{-\sqrt{p^2 + q^2} z}}{(ip \cos I \cos D + iq \cos I \sin D + \sqrt{p^2 + q^2} \sin I)} \quad (3.2.22)$$

y la anomalía total reducida al polo es  $\Delta T(x, y, 0)$ , quedando (Tejero, A.):

$$\mathfrak{I}\{\Delta T^*\} = F_{KIP}(p, q, z) \cdot \mathfrak{I}\{\Delta T(x, y, 0)\} \quad (3.2.23)$$

Las anomalías gravimétricas pueden ser localizadas sobre concentraciones de masas, pero esto no ocurre con las anomalías magnéticas cuando la magnetización y el campo geomagnético no son verticales. A menos que  $\hat{m}$  y  $\hat{f}$  sean verticales, en donde  $\hat{m}$  es un vector unitario en la dirección de la magnetización y  $\hat{f}$  es el vector unitario en dirección del campo geomagnético en el instante de la medición, cuando cambia la anomalía lateralmente, distorsiona su forma e incluso cambia su señal como se muestra en la figura 3.2.1

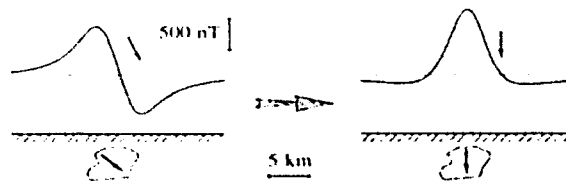


Figura 3.2.1 Anomalia magnética antes y después de reducción al polo (Blakely, 1996).

En términos generales, la magnetización y el campo geomagnético no son verticales, una distribución simétrica de magnetización (como una esfera magnetizada uniformemente) producirá un mejor sesgamiento como una anomalía magnética simétrica.

La reducción al polo remueve un nivel de complejidad desde el proceso interpretativo: estos cambios lateralmente son localizados sobre sus respectivas fuentes y cambia su forma, así que las fuentes simétricas ocasionan anomalías simétricas.

### **3.3 GRADIENTE HORIZONTAL**

La variación de la calidad de las propiedades físicas en alguna dirección para un cuerpo es llamado anisotropía. Existen diferentes grados de anisotropía a diferentes escalas: En el universo, en capas de la tierra, en sólidos cristalinos contenidos en rocas, en materiales biológicos, etc.

La anisotropía en las capas de la tierra se debe a diferentes causas, por ejemplo: a que los esfuerzos no son uniformes, a las corrientes de convección y el calor diferencial, esto aunado a que existe transporte de masa, dando un incremento en la anisotropía, en las propiedades eléctricas, magnéticas y termo-mecánicas en la corteza, manto y en el núcleo de la tierra.

La tierra es caracterizada por muchas irregularidades en sus parámetros físicos. Por lo tanto, los problemas de homogeneidad (tanto en dirección vertical como horizontal) y anisotropía son de mucha importancia para la geofísica (Negi y Saraf).

Para cuantificar el nivel de anisotropía magnética en los estudios de exploración, recurrimos a los procesos de gradiente vertical y horizontal.

Para términos de magnetometría, el gradiente horizontal es la variación del campo geomagnético hacia una cierta dirección, esto queda definido como un vector.

El gradiente horizontal puede ser calculado desde los datos de campo total o de anomalía total como la pendiente de perfiles en cualquier punto de interés, pretendiendo encontrar los cambios abruptos de la magnetización del terreno. El cual está dado por (Blakely, 1996):

$$h(x, y) = \left[ \left( \frac{\delta F_z(x, y)}{\delta x} \right)^2 + \left( \frac{\delta F_z(x, y)}{\delta y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.3.1)$$

Con el gradiente horizontal se pretende realizar una localización en superficie de las fuentes magnéticas del medio. Cuando aplicamos la prospección en dos dimensiones, el gradiente horizontal pretende hacer una estrecha investigación de los cambios de la magnetización en toda la superficie.

La interpretación del gradiente horizontal en términos de contrastes magnéticos y posteriormente en términos geológicos, requieren de una fuerte suposición fundamental. En particular, supondremos que los contrastes de las propiedades físicas serán verticales. Geológicamente esto no es posible, ya que la magnetización puede cambiar en todas direcciones en una unidad geológica y los contactos entre unidades no siempre son verticales.

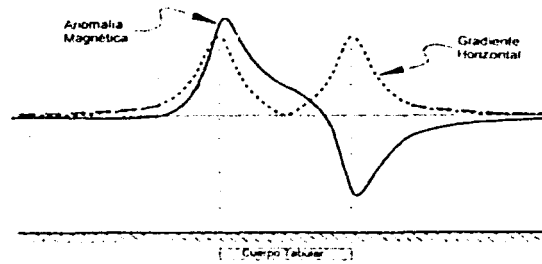
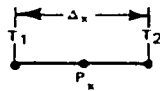


Figura 3.3.1 (Blakely, 1996), modificada.

En la figura 3.3.1 se muestra, como ejemplo, un perfil de una anomalía causada por un cuerpo tabular, en donde se observa que la anomalía se comporta como un dipolo magnético y el gradiente horizontal en valor absoluto refleja los cambios del máximo y del mínimo de la anomalía magnética, en donde el contraste del cuerpo tabular y el medio que lo aloja se ve reflejado en la figura. Por lo tanto, el gradiente horizontal muestra la dirección en donde los valores se incrementan.

De forma análoga, al realizar varios perfiles podemos obtener una superficie de gradiente horizontal.



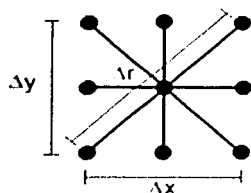
$$\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = \left. \frac{dT}{dx} \right|_{P_x} = \text{Gradiente Horizontal Medido en } P_x$$



Figura 3.3.2 Técnica para el gradiente horizontal 1D (Modificada de Breiner, 1973).

La figura 3.3.2 muestra como se realiza el cálculo del gradiente horizontal para un perfil, en donde  $T_1$  y  $T_2$  son las lecturas del magnetómetro,  $\Delta x$  es la diferencia de las distancias de  $T_2$  y  $T_1$ , y  $P_x$  es el punto al que se le asigna el valor del gradiente horizontal.

Para el caso de una superficie, como se muestra en la figura 3.3.3, consideraremos el mismo procedimiento que para el caso en un perfil, agregando dos nuevas distancias que son  $\Delta y$  y  $\Delta r$ , y considerando los valores de anomalía total de los puntos que se encuentran rodeando al punto central, al que se le asignará el nuevo valor de gradiente horizontal.



$$GH_r(x, y, \Delta F) = \frac{\left[ \sum_{m=1}^{n-1} \sum_{l=1}^{n-1} P(n, m) \right] - P(0,0)}{2\Delta x + 2\Delta y + 4\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}$$

$$\Delta x = |P(n, m) - P(n-1, m)|$$

$$\Delta y = |P(n, m) - P(n, m-1)|$$

Técnica de gradiente en 2D.

Figura 3.3.3

### 3.4 PROCESAMIENTO DE DATOS

Posterior a la exploración y adquisición de los datos, se realizó el procesado de los mismos, a continuación se describen los procesos realizados.

#### 3.4.1 Control de calidad

El control de calidad consiste esencialmente en cotejar los datos con algunas anotaciones de campo. Con esto podemos descartar datos dudosos, podemos así eliminar efectos indeseados sobre los procesos posteriores. Esta es una fase muy importante porque desde aquí es donde pueden evitarse errores en las siguientes etapas, el tener un buen control de calidad de los datos nos evitan regresar a buscar un posible error al inicio del proceso.

Sin embargo cabe recomendar que el control de calidad comienza desde la etapa de adquisición de datos, porque no siempre la persona que toma los datos es quien los interpreta, así que se debe tener especial cuidado en la adquisición de datos y en las oportunas anotaciones y observaciones que se hagan de estos en campo.

En nuestro caso, el control de calidad comenzó desde la etapa de adquisición, por ejemplo, los datos se recogieron en estaciones equiespaciadas, se orientaban los terrenos a manera de tener figuras rectangulares como resultado, esto nos asegura, en el caso de la interpolación, que tendremos mejores resultados, además que la visualización de los datos es más sencilla. También los datos se recogían en el menor tiempo posible para tener un menor efecto por variaciones temporales del campo, o posibles inicios de tormentas magnéticas o algún otro fenómeno. Además de tomar previamente algunas consideraciones como evitar todos los metales en las personas que están cerca del equipo de medición, mantener orientado el sensor del magnetómetro, mantener el sensor a una altura constante y preferentemente que sea la misma persona quien tome todos los datos, y en una misma sesión.

### 3.4.2 Corrección por variación diurna

Este proceso fue realizado para todos los casos de estudio, ya que mediante dicho proceso obtenemos los datos de anomalía total, que son aquellos que han de utilizarse en los posteriores procesos, además de ser un paso inevitable para el procesado de los datos obtenidos con el método magnético, con este cálculo obtenemos la anomalía de campo total (que es la expresión de la contribución cortical del campo geomagnético)

Para este proceso se diseñó un programa en Matlab (ver Anexo 2), el cual requiere como entrada únicamente un archivo de texto delimitado por tabulaciones, en el cual se introducen los datos del levantamiento y de la base. Como salida del programa se obtiene también un archivo de texto delimitado por tabulaciones con el resultado de la corrección por variación diurna.

El algoritmo de dicho proceso es el siguiente:

- Se obtiene un modelo matemático lineal a partir de los datos de la base para el periodo de tiempo que haya durado el levantamiento magnético de la zona de estudio, dicho modelo es una expresión de la forma:

$$y=mx+b$$

y para nuestro caso:

$$F=mt+b$$

estimado con el método de mínimos cuadrados, donde  $m$  es la pendiente de la recta,  $b$  la ordenada al origen,  $t$  el tiempo y  $F$  el valor de la magnitud del campo geomagnético.

- Se calculan las variaciones entre el modelo matemático y los datos de la base, para cada tiempo en que se realizó una medición del levantamiento magnético. Posteriormente se realiza una suma algebraica entre las variaciones y el valor leído en el levantamiento.
- Finalmente se sustrae el valor del campo principal. Una forma de hacer esto, es tomando como valor de éste, el calculado con el IGRF.

### 3.4.3 Reducción al polo

Como parte final de los procesos aplicados en el presente trabajo se hizo la reducción al polo de las mallas construidas para cada uno de los terrenos.

En este caso también se diseñó un programa para automatizar el cálculo de la reducción al polo, dicho programa esta hecho en Matlab (ver Anexo 2) y para hacer el cálculo requiere de un archivo, que contenga los datos de la anomalía magnética, además de los datos de inclinación y declinación magnéticas.

En la literatura se encuentran diferentes formas para el calculo de la reducción al polo de una anomalía magnética, y en el presente trabajo se eligio la siguiente ecuación

$$F\{\Delta T^z\} = \frac{(p^2 + q^2)F\{\Delta T(x, y, 0)\}k^{z^2}}{(p \cos I \cos D + iq \cos I \sin D + \sqrt{p^2 + q^2} \sin I)(p \cos i \cos d + iq \cos i \sin d + \sqrt{p^2 + q^2} \sin i)}$$

donde  $\Delta T(x, y, 0)$  son los valores del campo total anómalo en  $z=0$ .

Ahora bien, si consideramos que el vector de magnetización es igual al vector del campo geomagnético, la ecuación queda así:

$$F\{\Delta T^*\} = \frac{(p^2 + q^2)F\{\Delta T(x, y, 0)\}e^{\sqrt{p^2 + q^2}z}}{(ip \cos I \cos D + iq \cos I \sin D + \sqrt{p^2 + q^2} \sin I)^2}$$

donde el filtro de reducción al polo (figura 3.4.3.1) quedara expresado como

$$F_{RTP}(p, q, z) = \frac{(p^2 + q^2)e^{\sqrt{p^2 + q^2}z}}{(ip \cos I \cos D + iq \cos I \sin D + \sqrt{p^2 + q^2} \sin I)^2}$$

así finalmente tenemos una expresión con la siguiente forma

$$F\{\Delta T^*\} = F_{RTP}(p, q, z) \cdot F\{\Delta T(x, y, 0)\}$$

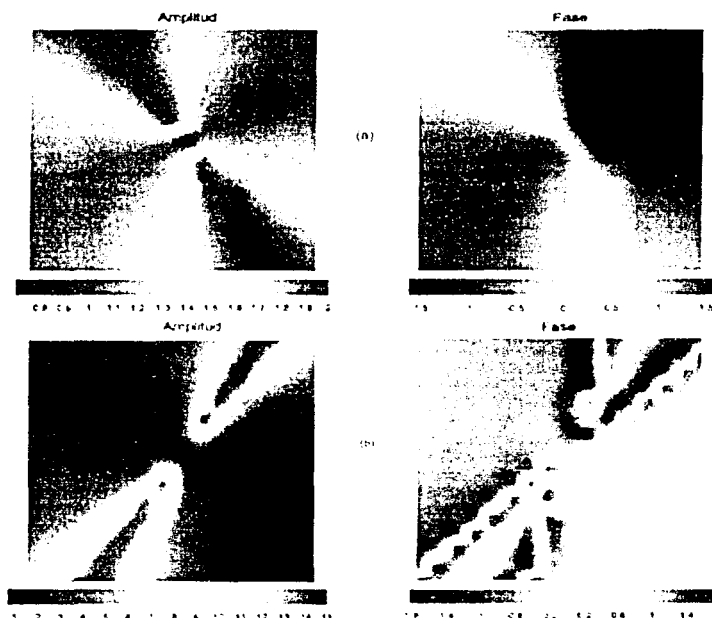


Figura 3.4.3.1 Espectros de amplitud y de fase para el filtro de RTP. (a) Se tiene el caso para latitud media, con  $I=45^\circ$  y  $D=30^\circ$ . (b) Un caso de latitud baja con  $I=15^\circ$  y  $D=30^\circ$ .

### 3.4.4 Gradiente horizontal

El proceso mas importante realizado en el presente trabajo es el cálculo del gradiente horizontal, ya que como se menciono anteriormente es una de las condiciones geofísicas que nos definen un sitio con potencial para la instalacion de un observatorio magnético.

Para este proceso ya se requieren los datos de anomalía total de los levantamientos. Para este caso también se diseñó un programa en Matlab (ver Anexo 2), el cual automatiza el cálculo del gradiente horizontal, teniendo como única entrada para el programa un archivo de texto delimitado por tabulaciones, en el cual se

incluyen las coordenadas  $X$ ,  $Y$  y el valor de la anomalía magnética. Como salida, el programa nos proporciona un gráfico, para visualizar el resultado y un archivo de texto delimitado por tabulaciones, el cual contiene coordenadas  $X$  y  $Y$  de cada punto, además del valor del gradiente horizontal en estos puntos. Cabe mencionar que para nuestros casos se realizaron interpolaciones en las mallas que originalmente se construyeron, esto con dos fines, el primero asignar valores a puntos que por alguna razón no lo tenían y segundo para dar una mayor definición a los datos y al proceso.

La ecuación que nos define el gradiente horizontal en nuestro caso es la siguiente:

$$GH_p(x, y, \Delta F) = \frac{\left[ \sum_{n=1}^{n-1} \sum_{m=1}^{m-1} P(n, m) \right] - P(0,0)}{2\Delta x + 2\Delta y + 4\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}$$

donde

$$\Delta x = |P(n, m) - P(n-1, m)|$$
$$\Delta y = |P(n, m) - P(n, m-1)|$$

Esta función nos define el gradiente horizontal en un punto de una malla, al menos de 3x3 datos, donde la posición de dicho punto en la matriz está definida por  $n$  y  $m$ , siempre y cuando el  $\Delta y$  y el  $\Delta x$  sean uniformes en toda la matriz (aunque el valor de  $\Delta y$  puede ser diferente al de  $\Delta x$ ).

#### 4. CASOS DE ESTUDIO

Los casos se refieren a los sitios que fueron visitados como parte del presente trabajo y que fueron objeto del estudio geofísico, dichos sitios se encuentran en el territorio de la República Mexicana. Donde las coordenadas geográficas para cada uno de ellos son:

- Teoloyucan (TEO)  
    Latitud =  $19^{\circ} 44' 45.100''$   
    Longitud =  $99^{\circ} 11' 35.735''$
- Juriquilla (UNICIT)  
    Latitud =  $20^{\circ} 42.1863'$   
    Longitud =  $100^{\circ} 26.8165'$
- Colima (OVC)  
    Latitud =  $19^{\circ} 22' 53.04''$   
    Longitud =  $103^{\circ} 40' 27.84''$
- Coeneo (OCI)  
    Latitud =  $19^{\circ} 48' 40.2''$   
    Longitud =  $101^{\circ} 41' 42.7''$

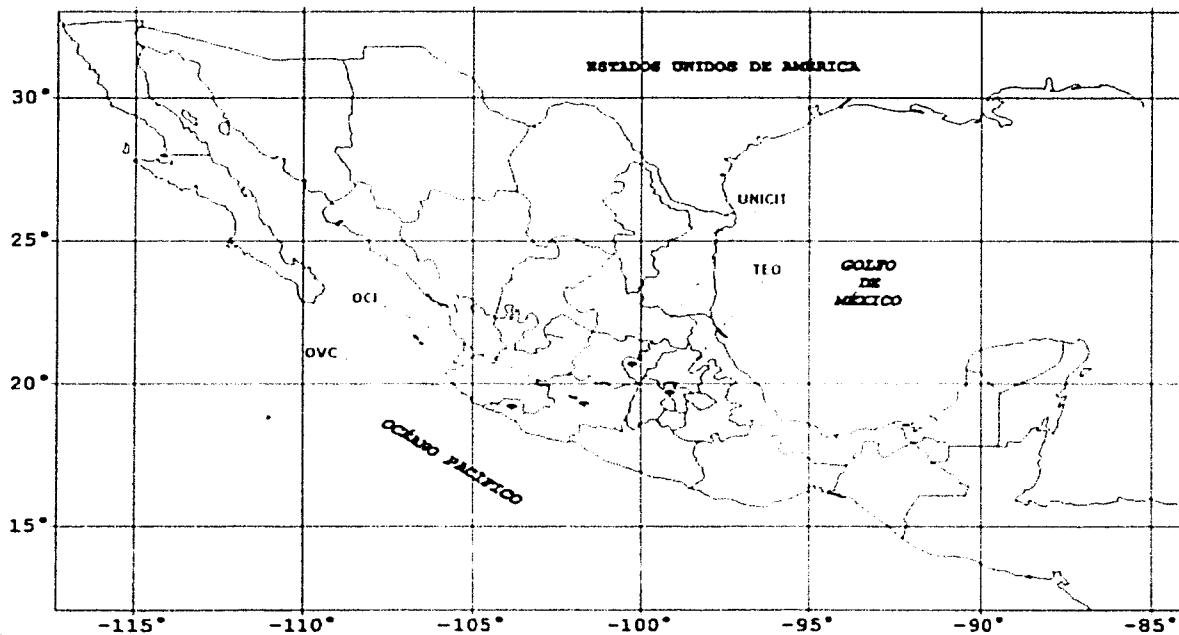


Figura 4.1 Ubicación de los casos de estudio en la República Mexicana



## 4.1 OBSERVATORIO MAGNÉTICO DE TEOLOYUCAN

### 4.1.1 Ubicación y situación geográfica

El Observatorio Magnético de Teoloyucan está ubicado a aproximadamente unos 36 Km al norte de la Ciudad de México (ver mapa 4.1.1.1) en el municipio de Teoloyucan, en el Estado de México (en la parte central del territorio de la Republica Mexicana), las coordenadas geográficas extremas del estado son: al norte 20°17', al sur 18°22' de latitud norte; al este 98°36', al oeste 100°37' de longitud oeste. Dicho estado ocupa aproximadamente el 1.1% del territorio nacional y los estados con los que colinda son: al norte con los estados de Michoacán de Ocampo, Querétaro de Arteaga e Hidalgo; al este con Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Morelos y el Distrito Federal; al sur con Morelos y Guerrero; al oeste con Guerrero y Michoacán de Ocampo.

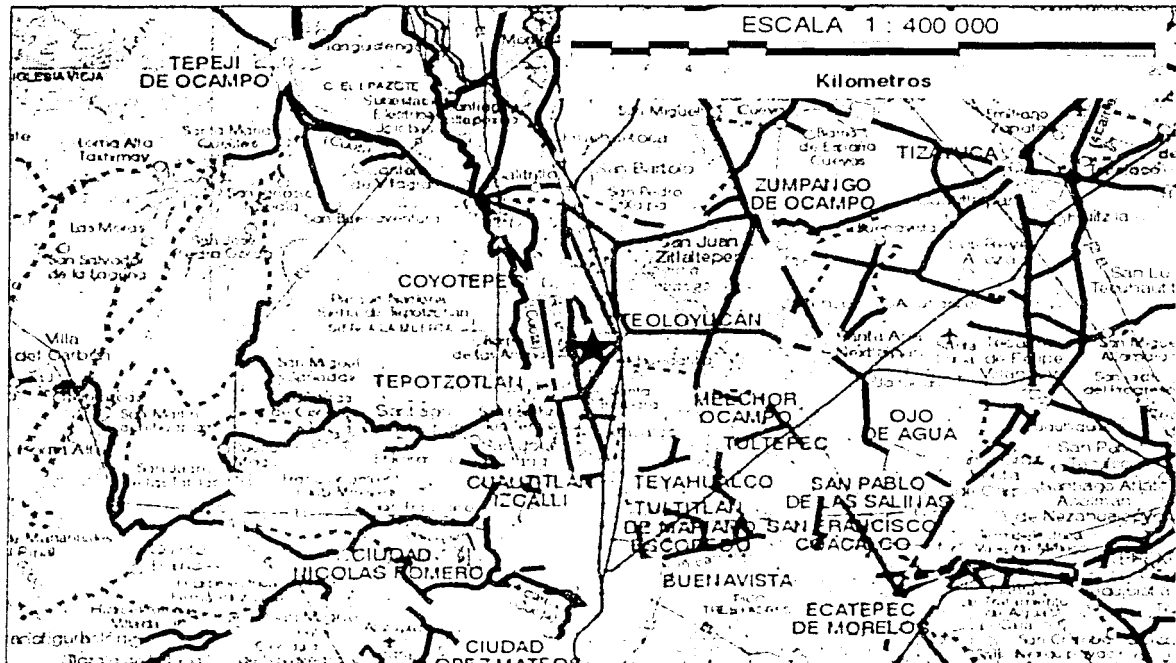


Figura 4.1.1.1

★ Observatorio Magnético de Teoloyucan

La temperatura media anual de la región donde se ubica el Observatorio Magnético de Teoloyucan es de 22 a 24 °C. Y su precipitación total anual es de unos 800 mm. Se encuentra en los límites de la mancha urbana y los territorios de agricultura de riego y agricultura de temporal, la vegetación predominante es de pastizales.

Las vías de comunicación más importantes del estado, son las carreteras que unen la Ciudad de Toluca de Lerdo con el Distrito Federal, Puebla y Tlaxcala, la capital del Estado y Michoacán, Guerrero y Querétaro, el propio estado con Pachuca y la que une las localidades de Tepotzotlán y Polotitlán. La entidad

cuenta con un Aeropuerto Internacional en la ciudad de Toluca y una red ferroviaria que se extiende por gran parte del estado (INEGI, 2000).

#### 4.1.2 Fisiografía y geología

El Estado de México comprende áreas que corresponden a dos provincias fisiográficas: el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur. El Observatorio Magnético de Teoloyucan esta ubicado en la provincia del Eje Neovolcánico, específicamente en la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac.

Esta provincia colinda al norte con la Llanura Costera del Pacífico, la Sierra Madre Occidental, la Mesa Central, la Sierra Madre Oriental y la Llanura Costera del Golfo Norte; al sur, con la Sierra Madre del Sur y la Llanura Costera del Golfo Sur. Por el oeste llega al Océano Pacífico y por el este al Golfo de México. Abarca parte de los estados de Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Colima, Puebla y Veracruz, así como todo el estado de Tlaxcala y el Distrito Federal.

Se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de todos tipos, acumulada en innumerables y sucesivas etapas, desde mediados del Terciario (unos 35 millones de años atrás) hasta el presente.

La integran grandes sierras volcánicas, coladas lávicas de gran extensión y espesor, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arena y cenizas.

Otro rasgo esencial de la provincia es la existencia de amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos (Pátzcuaro, Cuitzeo, Texcoco, el Carmen, etc.) o por depósitos de lagos antiguos (Zumpango, Chalco, Xochimilco, diversos llanos en el Bajío Guanajuatense, etc.). Estos lagos se han formado por bloqueo del drenaje original, debido a lavas u otros productos volcánicos, o por el afallamiento, que es otro rasgo característico de la provincia. Un área rodeada de fallas se hunde y forma una depresión llamada graben que se llena de agua; este es el origen del lago de Chapala (Zavala Sánchez, 2002).

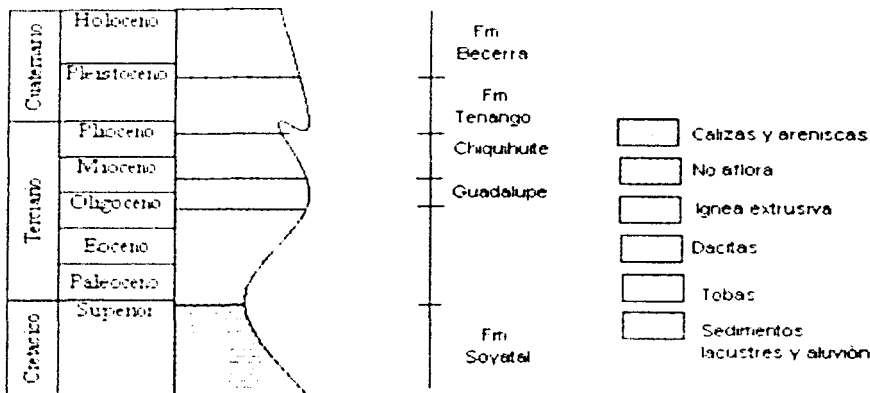


Figura 4.1.2.1 Columna estratigráfica del área de Teoloyucan (modificada de Lopez Ramos, 1979).

Una de las principales estructuras geológicas presente en la entidad son los aparatos volcánicos, que tienen su representación más notable en los volcanes Ixtaccihuatl, Popocatepetl y Nevado de Toluca, además

de las fallas y fracturas regionales asociadas al vulcanismo. Este conjunto de estructuras da origen a zonas favorables para la explotación de acuíferos, yacimientos minerales y bancos de materiales (INEGI, 2000).

#### **4.1.3 Exploración magnética**

En las instalaciones del Observatorio Magnético de Teoloyucan se realizaron un par de levantamientos magnéticos, ambos llevados a cabo el 16 de mayo del año 2002.

El magnetómetro utilizado para dicho estudio fue un magnetómetro Scintrex Envi-Mag de precesión protónica. El parámetro medido en este estudio fue F y para la corrección por variación diurna se utilizaron los propios datos del observatorio, en este caso sólo los obtenidos por el magnetómetro Geometrics G-856 (también de precesión protónica), ya que dicho magnetómetro también registra F.

El primero de estos levantamientos dio como resultado un terreno que abarca el espacio en el que se encuentran instaladas las casetas tanto de variógrafos, como la de mediciones absolutas, dicho terreno es denominado como Teoloyucan 1, es rectangular y tiene como dimensiones 50 x 150 metros, las estaciones se hicieron cada 10 metros, esto nos da como resultado 16 estaciones por línea, la distancia entre líneas también se tomo como 10 metros, por lo tanto tenemos 6 líneas y un total de 96 mediciones de F.

El segundo levantamiento abarca la porción sur de las instalaciones del observatorio, es denominado como Teoloyucan 2, y dio como resultado un terreno rectangular de 40 x 70 metros, y de igual forma al anterior los datos fueron tomados cada 10 metros, lo que implica que tenemos ocho líneas con cinco datos cada una y un total de 40 mediciones de F (ver figura 4.1.3.1).

El día que se realizó este estudio no existió alguna tormenta magnética ni alguna otra variación que nos hagan dudar de la confiabilidad de los datos recogidos. Además que el observatorio estuvo funcionando correctamente, por lo que los datos para las correcciones son altamente confiables.

#### **4.1.4 Resultados**

En la figura 4.1.4.1 se presentan cuatro mapas que corresponden a Teoloyucan 1, en la figura 4.1.4.2 también se muestran cuatro mapas y estos son los correspondientes a Teoloyucan 2. Estos mapas son el resultado de los diferentes procesos aplicados a los datos recogidos en campo. Los ejes horizontal y vertical denotan distancia en metros. Tanto en la figura 4.1.4.1 como en la figura 4.1.4.2, el caso (a) se expresa el campo total (F), en el mapa (b) tenemos la anomalía magnética total. En los casos (c) y (d) se presentan la reducción al polo y el gradiente horizontal respectivamente.

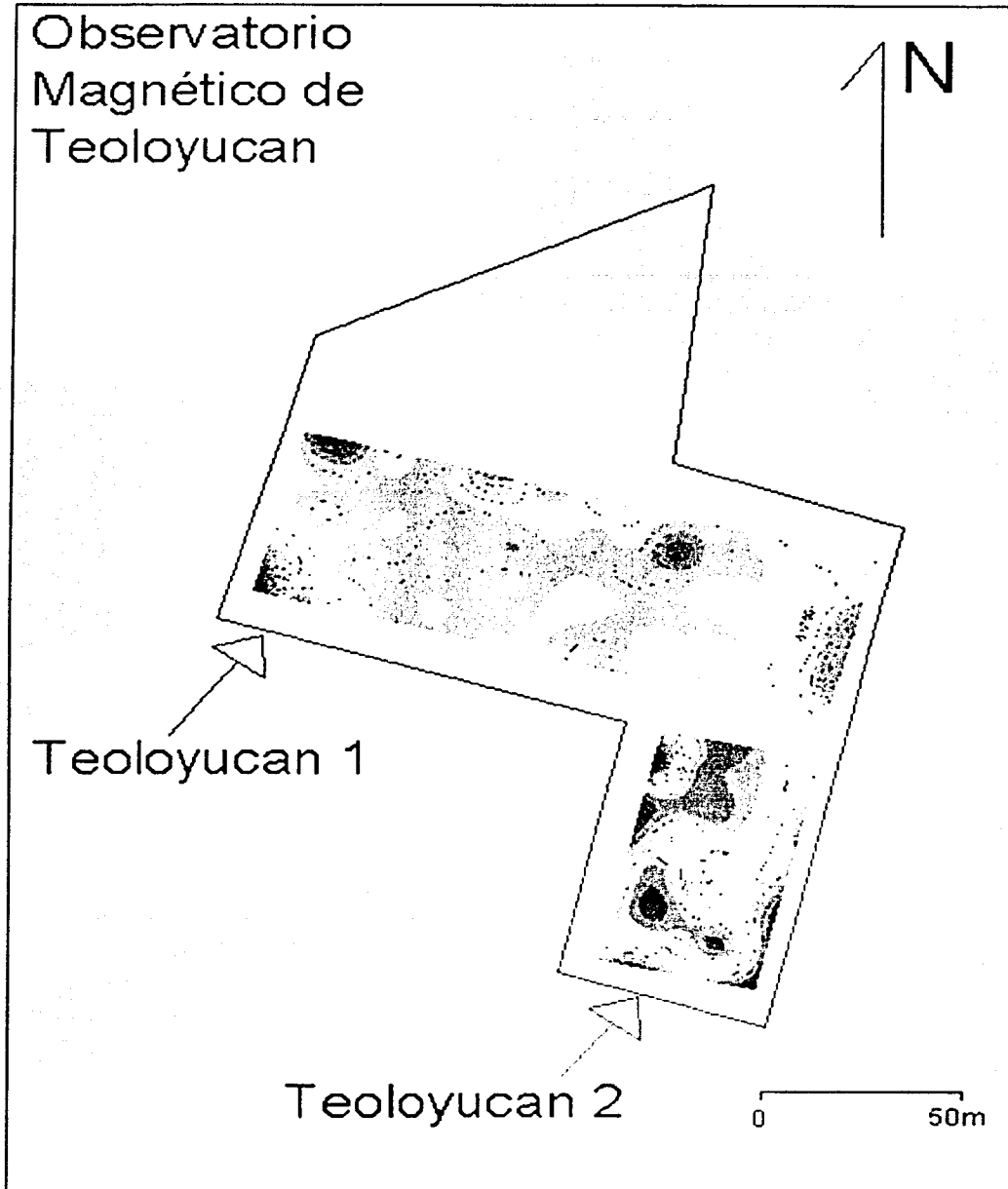


Figura 4.1.3.1 En este mapa se muestra la ubicación de los terrenos levantados en TEO.

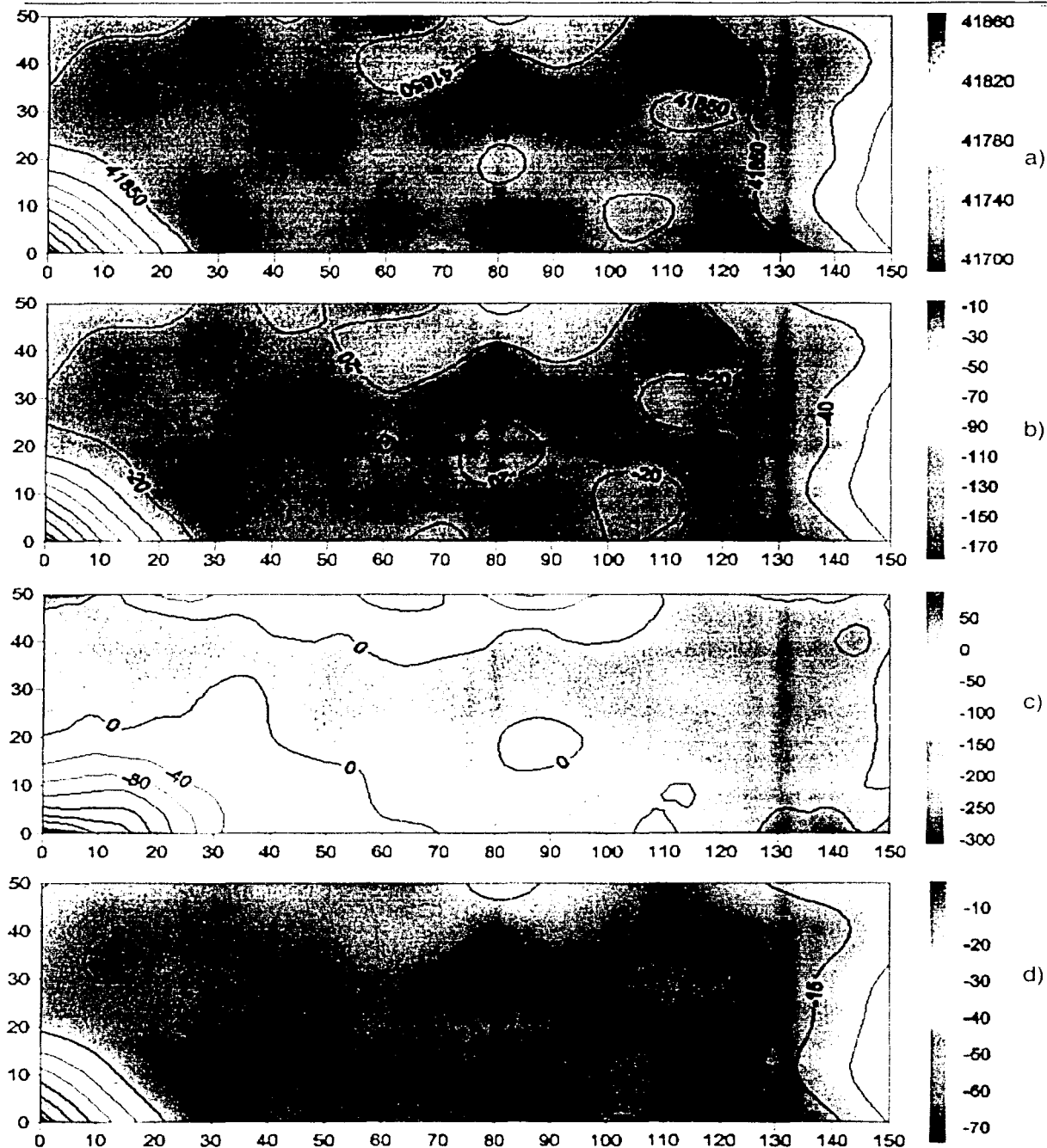


Figura 4.1.4.1. Tequisquisilco: (a) Mapa de Campo Total (curvas a cada 20 nT); (b) Mapa de Anomalia Magnética (curvas a cada 20 nT); (c) Mapa de Restacional Polo de la Anomalia (curvas a cada 40 nT); (d) Mapa de Gradiente Horizontal de la Anomalia (curvas a cada 10 nT). Las escalas están dadas en nT.

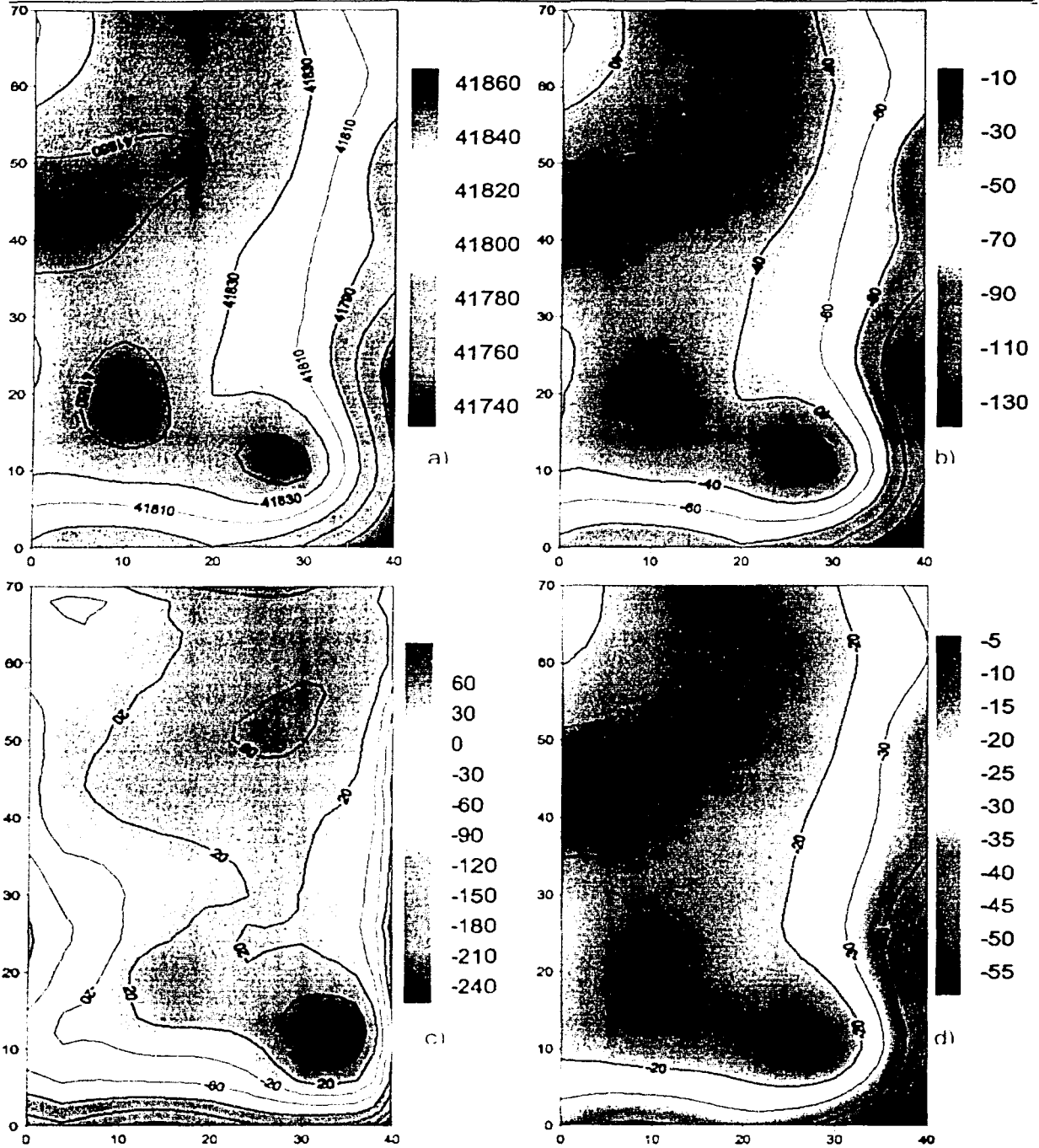


Figura 4.1.4.2 Teoloyucan 2. (a) Mapa de Campo Total (curvas a cada 20 nT). (b) Mapa de Anomalia Magnética (curvas a cada 20 nT). (c) Mapa de Reducción al Polo de la Anomalia (curvas a cada 40 nT). (d) Mapa de Gradiente Horizontal de la Anomalia (curvas a cada 10 nT). Las escalas están dadas en nT.

## 4.2 CAMPUS JURIQUELLA, UNAM

### 4.2.1 Ubicación y situación geográfica

El Campus Juriquilla de la Universidad Nacional Autónoma de México, que alberga las instalaciones de la Unidad de Ciencias de la Tierra (UNICIT), está localizado en el estado de Querétaro de Arteaga aproximadamente a 13 Km al norte de la Ciudad de Querétaro (ver mapa 4.2.1.1), en la parte central del país y con coordenadas geográficas extremas de 21°40' al norte, al sur 20°01' de latitud norte; al este 99°03', al oeste 100°36' de longitud oeste. El estado de Querétaro de Arteaga representa aproximadamente el 0.6% del territorio de la República Mexicana. Colinda al norte con Guanajuato y San Luis Potosí, al este con San Luis Potosí e Hidalgo, al sur con Hidalgo, México y Michoacán de Ocampo y al oeste con Guanajuato.

La UNICIT se encuentra ubicada en una región, en donde la temperatura media anual es de 18 a 20°C, y su precipitación total anual promedio es de 500 a 600mm. Se encuentra en una zona en la que predomina la agricultura de temporal y la agricultura por riego.

El estado cuenta con una amplia red caminera que permite una agil comunicación entre la mayoría de sus localidades, así como con las Ciudades de México, Guanajuato y San Luis Potosí. Una de las mayores vías de comunicación es la autopista que comunica a la capital del estado con la capital del país, además de contar con una buena red ferroviaria que complementa a la red de caminos. El transporte terrestre también se ve complementado por la estación aérea que se encuentra en la Ciudad de Querétaro (INEGI, 2000).

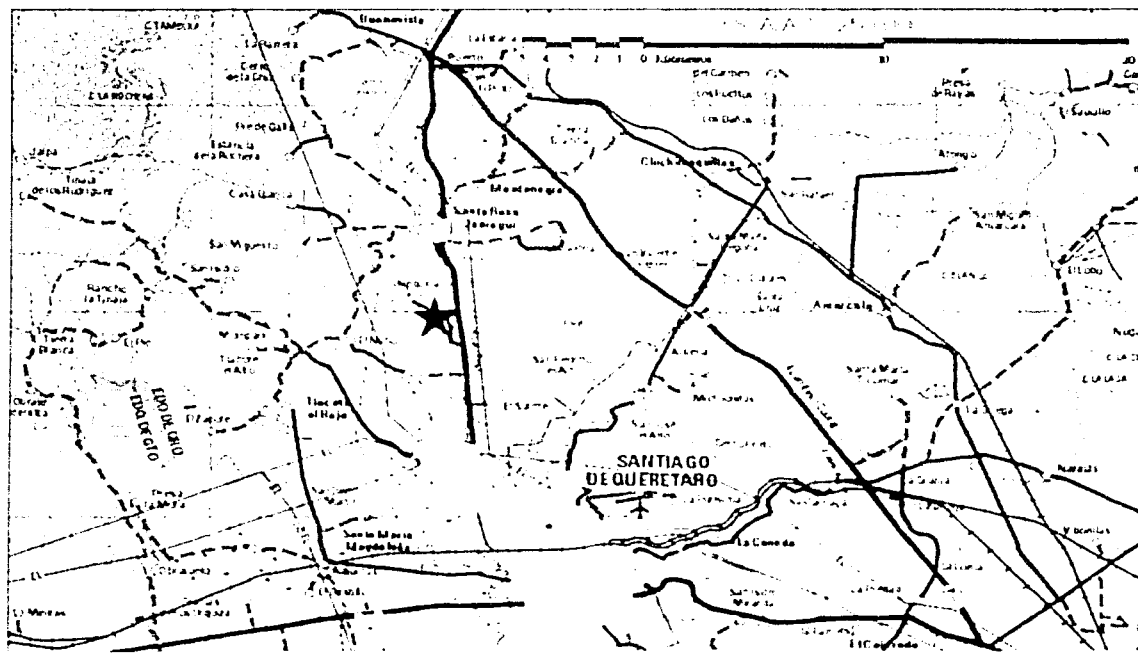


Figura 4.2.1.1

★ Unidad de Ciencias de la Tierra

#### 4.2.2 Fisiografía y geología

El estado de Querétaro de Arteaga comprende tres provincias fisiográficas, la del eje Neovolcánico, la de la Sierra Madre Oriental y la de la Mesa del Centro. La UNICIT se encuentra enclavada en la provincia del Eje Neovolcánico, que en el estado esta representada por dos subprovincias, la de Mil Cumbres y la Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, y es en ésta última en la que se localiza la zona de estudio.

La subprovincia presenta un corredor de lomeríos bajos y llanuras, este queda encerrado por sistemas de sierras, mesetas y lomeríos, casi todos de origen volcánico, que exceden los 2,000 msnm. La zona de Amealco es de particular interés por su pequeño pero vistoso cañón del río Las Zúñigas, que alimenta a la presa Constitución de 1917.

Al noreste de San Juan del Río, en una meseta asociada con lomeríos, se inicia el imponente cañón del Moctezuma, límite entre Querétaro e Hidalgo.

Geológicamente la provincia del Eje Neovolcánico abarca una gran porción del centro y sur del estado la morfología del paisaje está representada por diversos tipos de estructuras volcánicas, como son conos cineríticos, volcanes compuestos, flujos piroclásticos y extensos derrames lávicos de basalto con formas de mesetas y planicies. El conjunto de estructuras volcánicas características del paisaje de Querétaro se conformó sobre un paleorrelieve constituido por las rocas sedimentarias del Mesozoico, plegadas, correlativas con las que afloran en la Sierra Madre Oriental.

La evolución de los fenómenos volcánicos propició el cierre de algunas cuencas que fueron azolvadas con aportes volcanoclasticos, los cuales litológicamente tienen características de rocas volcánicas depositadas en un medio lacustre y por lo tanto aparecen estratificadas.

Las fases neotectónicas distensivas, asociadas con fenómenos volcánicos recientes, han contribuido a la formación de los rasgos del relieve de esta entidad, pues el fallamiento normal y el fracturamiento son los principales controles de sus incipientes patrones de drenaje.

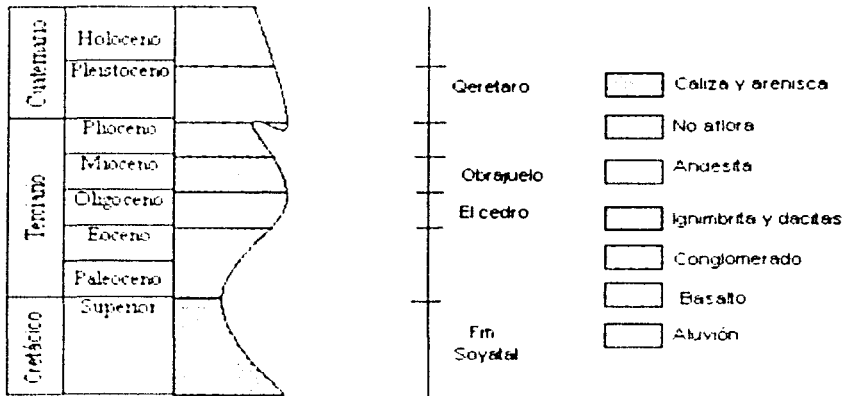


Figura 4.2.2.1 Columna estratigráfica del área de Junquilla (modificada de Zavala Sanchez, 2002).

Existen varios sistemas de fallas y fracturas pero sólo aparecen representadas las que tienen orientación noroeste-sureste. Al parecer, estos patrones están relacionados con las zonas donde hay



manifestaciones hidrotermales, como Tequisquiapan. La importancia económica de la geología en el estado, queda representada en la explotación de minerales metálicos y no metálicos, y la explotación de diversos tipos de roca como materia prima para la construcción (INEGI, 2000).

#### **4.2.3 Exploración magnética**

En el campus de la UNAM en Juriquilla, que alberga las instalaciones de la Unidad de Ciencias de la Tierra se realizaron tres levantamientos magnéticos, dos de ellos llevados a cabo los días 12 y 13 de julio del año 2000 y el tercero el día 11 de julio del año 2001.

Para el estudio durante el cual se recabaron los datos de los primeros dos terrenos, denominados como Juriquilla 1 y Juriquilla 2, se utilizó en los levantamientos un magnetómetro de la marca Geometrics modelo G-856, teniendo como base para esta ocasión un magnetómetro Scintrex modelo Envi-Mag, ambos magnetómetros de precesión protónica.

En el caso del tercer terreno, que se denomina como Juriquilla 3, se utilizó para el levantamiento un magnetómetro de marca GEM modelo GSM19 Overhauser, y utilizando como base el magnetómetro Geometrics modelo G-856 del Observatorio Magnético de Teoloyucan (ambos magnetómetros también de precesión protónica). El parámetro medido para estos estudios fue la componente de campo total F.

El terreno llamado Juriquilla 1, que es el terreno que se encuentra más al oriente de los tres estudiados, consta de una malla de seis líneas con un promedio de 40 estaciones por línea, las estaciones se hicieron cada cinco metros (dentro de una misma línea) y con 10 metros de distancia entre líneas, teniendo como resultado un terreno rectangular de 50 x 200 metros, que consta de 235 mediciones de F.

El segundo terreno, Juriquilla 2, ubicado en la parte norte del edificio de Ciencias de la Tierra, es una retícula de siete líneas con 28 estaciones en promedio por cada línea, dichas estaciones tienen un espaciamiento de cinco metros (en la misma línea) y 10 metros de separación entre cada línea, y esto nos da como resultado un terreno rectangular de dimensiones 60 x 140 metros y que consta de 194 mediciones del campo total F.

El tercer terreno, que se encuentra en la parte suroeste del edificio de Ciencias de la Tierra, llamado Juriquilla 3, es una malla de 11 líneas con 11 estaciones en promedio por cada línea, la distancia entre estaciones fue de 10 metros, tanto entre datos de la misma línea como entre líneas, resultando un terreno cuadrangular con 100 metros por lado y con 110 mediciones del campo total F (Hernandez-Ordóñez et al., 2001). Una panorámica general de los terrenos se muestra en la figura 4.2.3.1.

#### **4.2.4 Resultados**

Se presentan ahora tres figuras, en las cuales están los resultados de los procesos aplicados a cada uno de los terrenos de estudio. La figura 4.2.4.1 corresponde a Juriquilla 1, la figura 4.2.4.2 contiene los resultados de Juriquilla 2, mientras que la figura 4.2.4.3 corresponde al terreno Juriquilla 3.

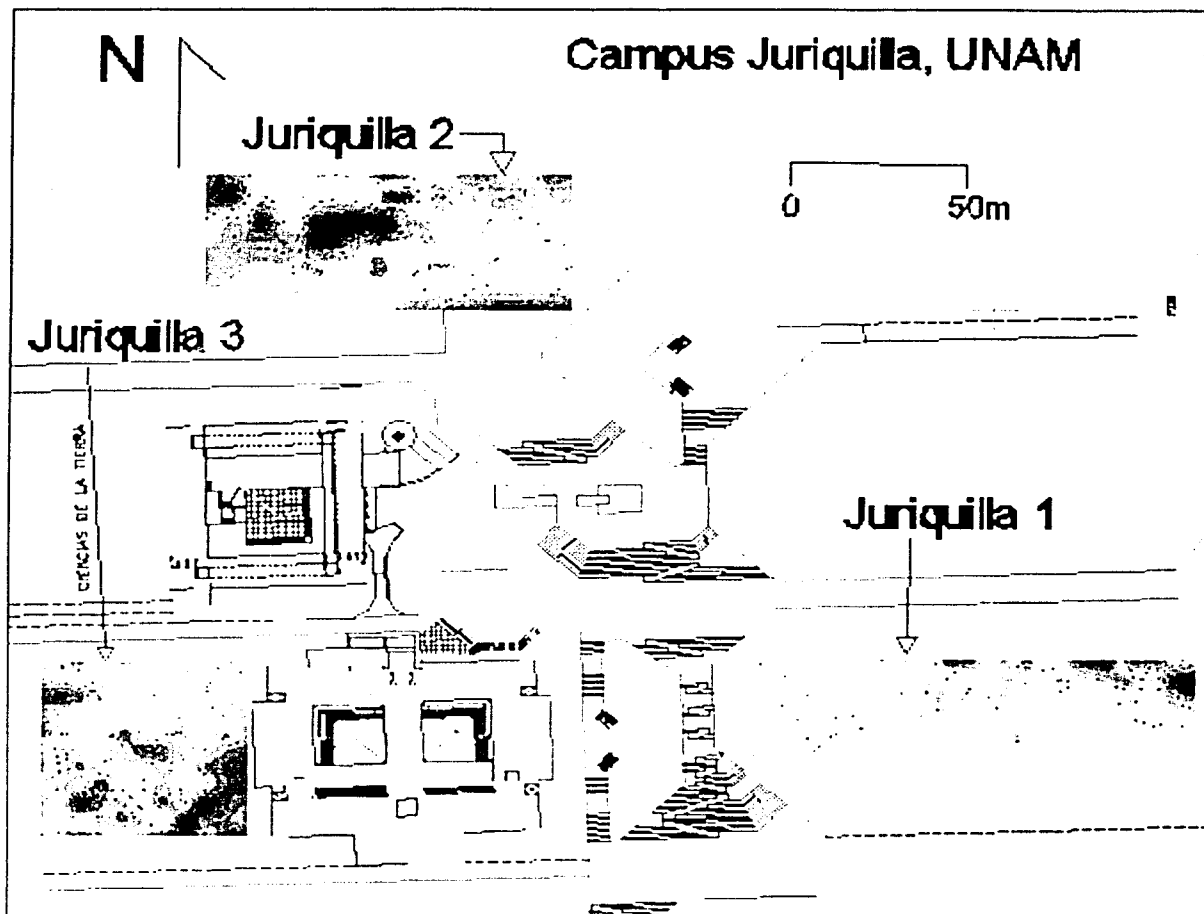


Figura 4 2.3.1. En este mapa se muestra la ubicación de los terrenos levantados en el campus Juriquilla de la UNAM.

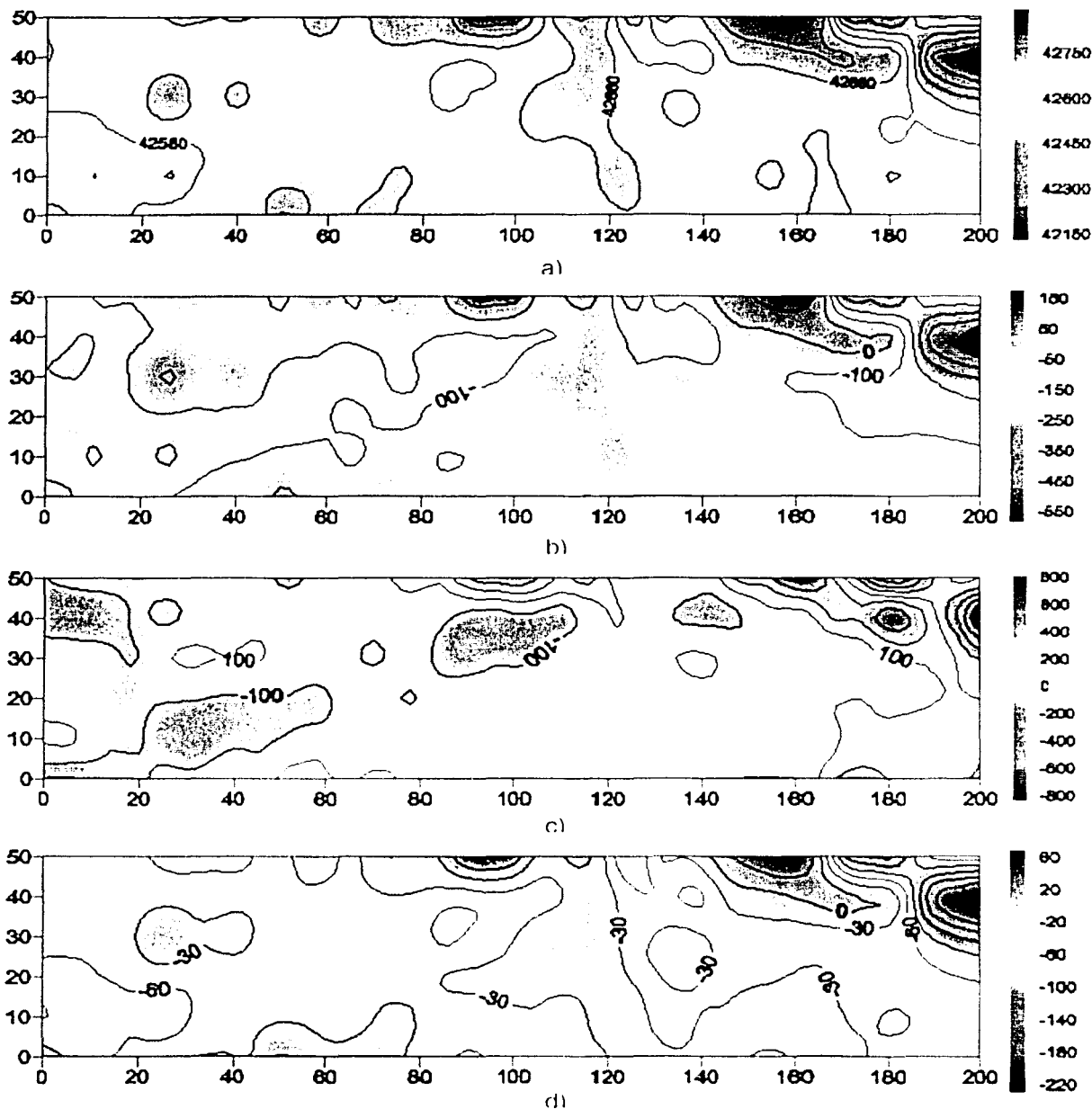


Figura 4.2.4.1. Juriquilla 1. (a) Mapa de Campo Total (curvas a cada 80 nT) (b) Mapa de Anomalia Magnética (curvas a cada 100 nT) (c) Mapa de Reducción al Polo de la Anomalia (curvas a cada 100 nT) (d) Mapa de Gradiente Horizontal de la Anomalia (curvas a cada 30 nT) Las escalas están dadas en nT

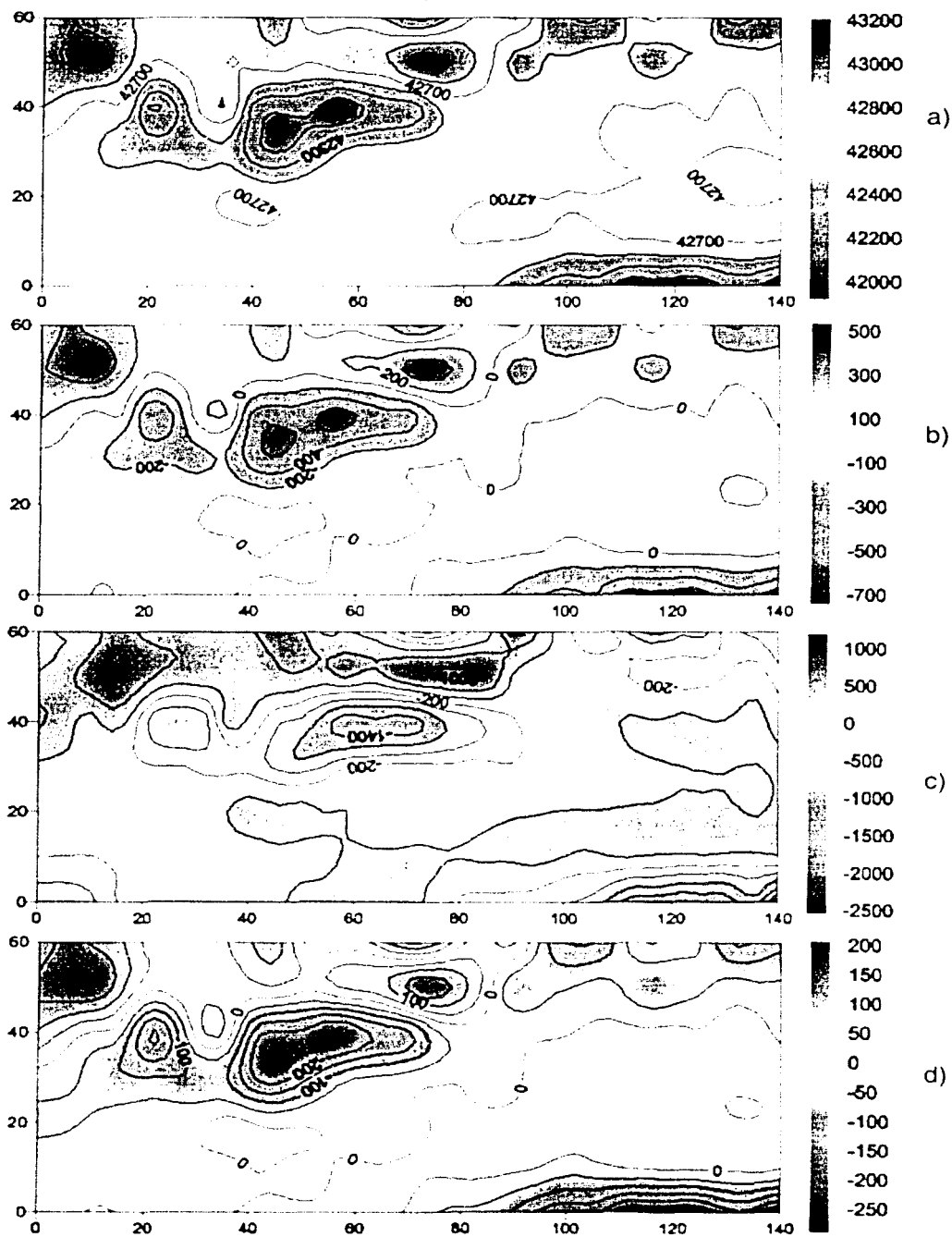


Figura 4.2.4.2 Juriquilla 2. (a) Mapa de Campo Total (curvas a cada 200 nT). (b) Mapa de Anomalia Magnética (curvas a cada 200 nT). (c) Mapa de Reducción al Polo de la Anomalia (curvas a cada 400 nT). (d) Mapa de Gradiente Horizontal de la Anomalia (curvas a cada 50 nT); Las escalas están dadas en nT

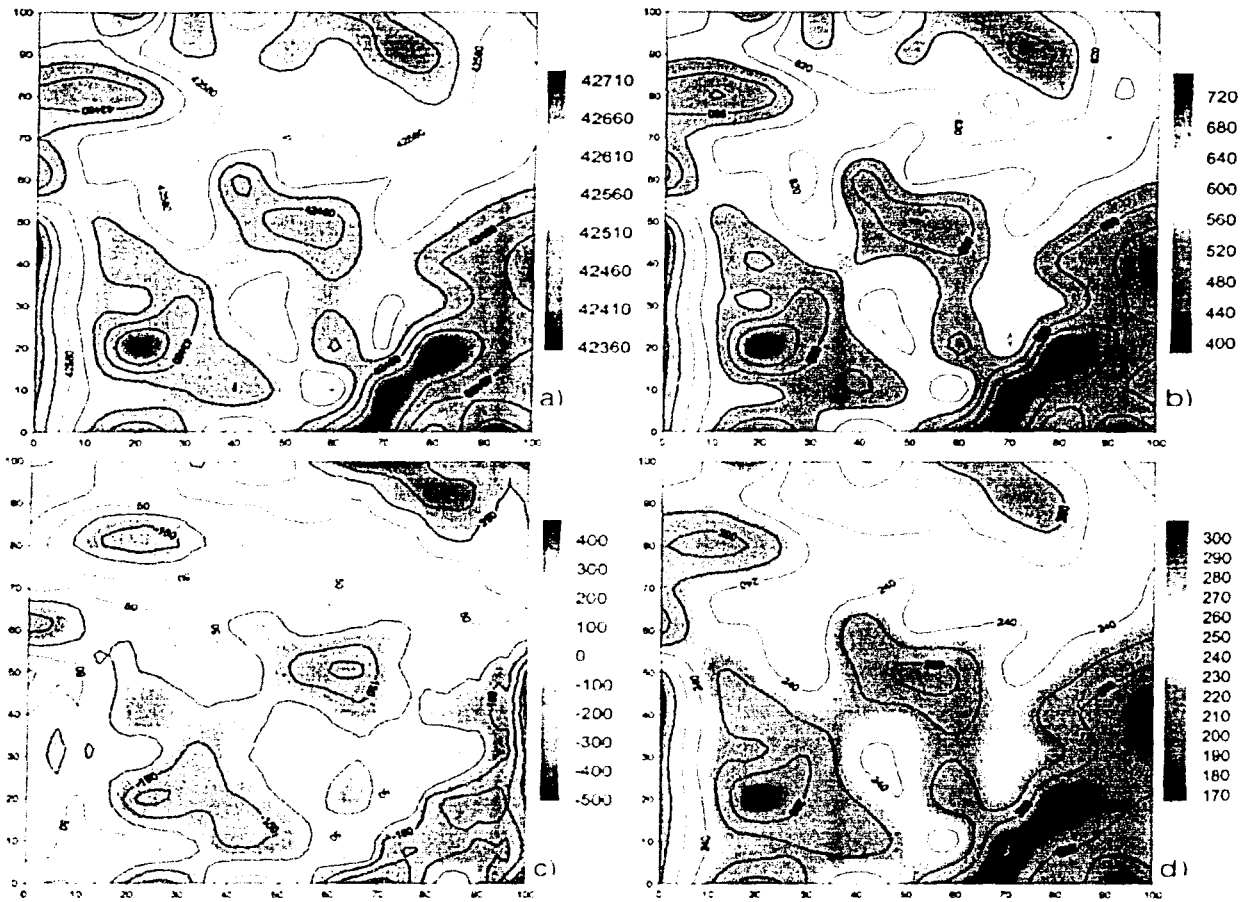
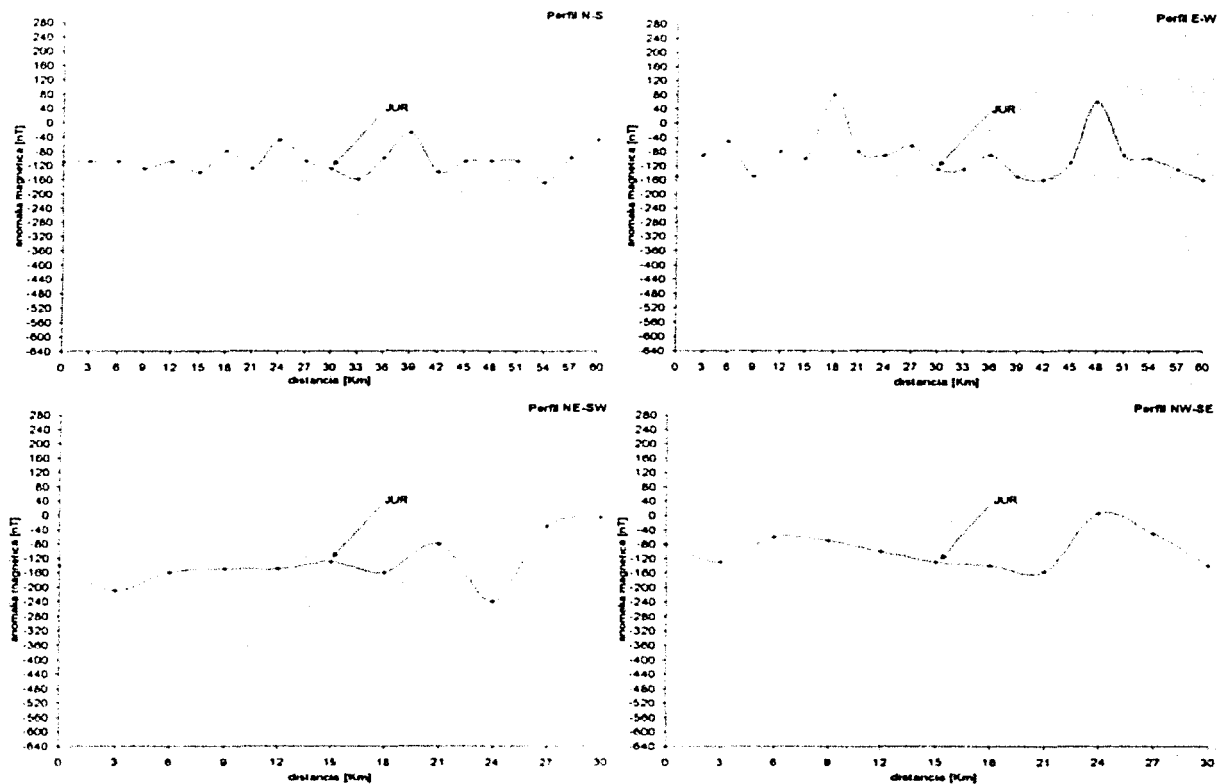


Figura 4.2.4.3. Junquilla 3. (a) Mapa de Campo Total (curvas a cada 40 nT) (b) Mapa de Anomalia Magnética (curvas a cada 40 nT) (c) Mapa de Reducción al Polo de la Anomalia (curvas a cada 100 nT) (d) Mapa de Gradiente Horizontal de la Anomalia (curvas a cada 20 nT). Las escalas están dadas en nT.

Adicionalmente se obtuvieron cuatro perfiles magnéticos, tomando como punto central a la UNICIT, las direcciones de dichos perfiles son: N-S, y E-W con una extensión de 60 kilómetros y NW-SE y NE-SW con una extensión total de 30 kilómetros. A continuación se presentan las gráficas obtenidas.



### 4.3 OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO DE COLIMA

#### 4.3.1 Ubicación y situación geográfica

El Observatorio Vulcanológico de Colima (OVC), se encuentra en el estado de Colima a aproximadamente 29 Km al norte de la Ciudad de Colima (ver mapa 4.3), en la parte central y al oeste del país, las coordenadas geográficas extremas del estado son: al norte 19° 31', al sur 18° 41' de latitud norte; al este 103° 29' y al oeste 104° 41' de longitud oeste. El estado de Colima representa apenas un 0.3% del territorio nacional. Colinda al norte con Jalisco, al este con Jalisco y Michoacán de Ocampo, al sur con Michoacán de Ocampo y el Océano Pacífico y al oeste con el Océano Pacífico y Jalisco.

La región del OVC goza de un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, y una temperatura media anual entre los 24 y 26°C. En la zona la precipitación promedio anual puede variar de los 1000 a 1500

mm. Se encuentra en una región en la que la agricultura es de temporal, pero se tiene la presencia en la zona de selva baja.

El estado de Colima cuenta con las suficientes vías de comunicación para crear las condiciones que fomenten el desarrollo de la región, se cuenta con una muy buena red carretera que comunica al estado con el interior de la república, ya sea por el norte, sur y el este, existe una buena infraestructura. Esta red carretera es complementada con el ferrocarril que va de la Ciudad de Guadalajara, Jalisco, y cruza el estado de noreste a suroeste, hasta llegar al puerto de Manzanillo. Además se cuenta con tres aeropuertos en el estado, uno de ellos en Colima y otros dos en Manzanillo, uno de ellos con el rango de internacional. Por ser un estado costero, tiene un puerto muy importante, el de Manzanillo, que ofrece los servicios de cabotaje y altura (INEGI, 2000).

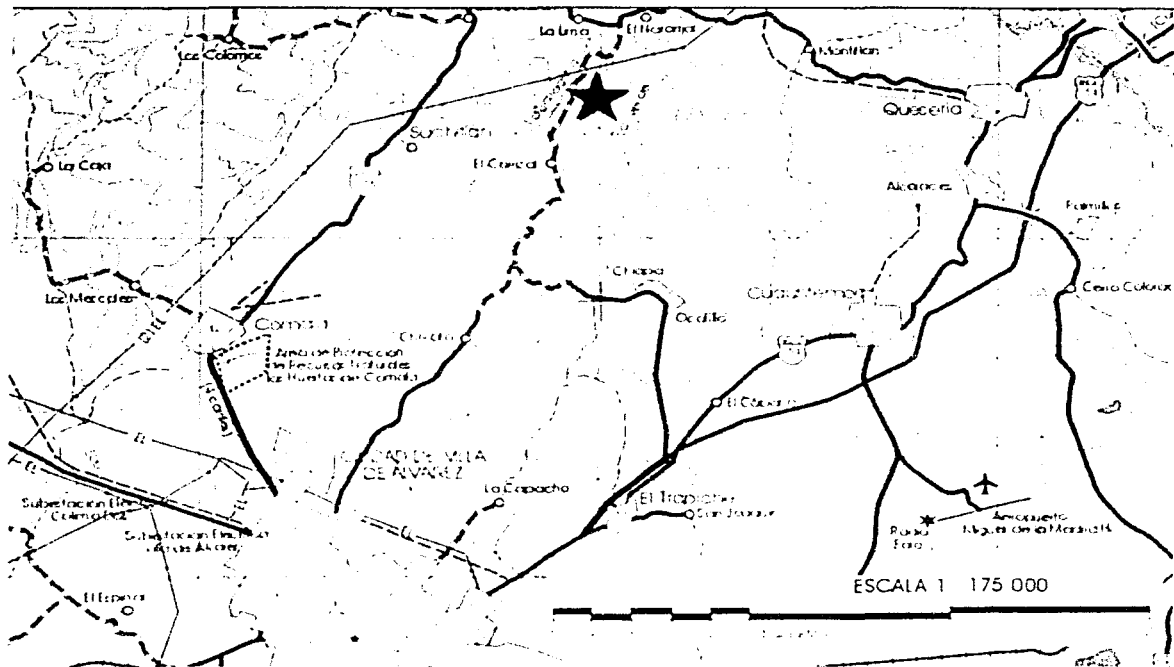


Figura 4.3

★ Observatorio Vulcanológico de Colima

#### 4.3.2 Fisiografía y geología

El territorio estatal de Colima encierra a dos provincias fisiográficas, la del Eje Neovolcánico y la de la Sierra Madre del Sur. El OVC fisiográficamente se encuentra localizado en la parte más occidental del Eje Neovolcánico, en la subprovincia Volcanes de Colima, esta provincia queda comprendida en la zona conocida como Valle de Colima, al norte del estado, y quedan dentro de ella parte de los municipios de Comala, Villa de Álvarez, Colima, una pequeña parte de Coquimatlán, y casi todo el municipio de Cuauhtémoc.

Los volcanes de Colima, uno apagado y el otro activo, conocidos como Nevado de Colima el primero (y que queda dentro del estado de Jalisco) y el Volcán del Fuego o de Colima, el segundo, son integrantes del Eje Neovolcánico. Se trata de dos estrato-volcanes constituidos de andesitas (rocas lávicas de contenidos medios en sílice total). Sus altitudes son de 4 240 msnm (el Nevado) y 4 220 m (el de Colima) msnm.

Al estado de Colima corresponde la ladera sur del volcán del mismo nombre, dentro del área comprendida entre el arroyo, La Lumbre en el oeste, y la barranca del Muerto en el este. De este modo las barrancas de San Antonio y Playa de Montegrando quedan dentro del estado.

En Colima hay afloramientos de los diferentes tipos fundamentales de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas).

Las metamórficas son las más escasas y las más antiguas, pues se les asigna una edad correspondiente al Jurásico.

Las ígneas tanto intrusivas como extrusivas son las más abundantes, abarcan un amplio periodo que va desde fines del Cretácico hasta el Terciario Superior. Forman estructuras volcánicas sobresalientes en el paisaje nacional, como el Volcán de Colima.

Las sedimentarias marinas del Cretácico también están ampliamente distribuidas por el territorio de la entidad, y forman estructuras plegadas, discontinuas, debidas a las rupturas producidas en la corteza terrestre por la actividad volcánica tectónica.

El estado se encuentra incluido en dos provincias fisiográficas: Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur. En cuanto al Eje Neovolcánico, cubre la porción noreste de la entidad y colinda al occidente y al sur con la de la Sierra Madre del Sur. Las rocas más antiguas en esta región son las volcánicas y provienen de la actividad extrusiva del Volcán de Colima. Los depósitos aluviales presentes en los valles que bordean el Nevado corresponden al Cuaternario.

Las estructuras geológicas más importantes de esta provincia son las formadas por las rocas ígneas extrusivas, como el Volcán de Colima y sus coladas de lava. En esta parte de Colima no hay manifestaciones de minerales económicamente explotables.

En lo que respecta a la Sierra Madre del Sur, esta provincia cubre la mayor parte del estado, limita con el Eje Neovolcánico y con el Océano Pacífico. Las rocas más antiguas de Colima son las metamórficas del Jurásico y sólo afloran en un área reducida al oriente de la localidad de Ciruelito de la Marina.

Hay fuertes depósitos sedimentarios de ambiente marino (lutitas-areniscas, calizas y yesos) del Cuaternario. El batolito ( cuerpo de rocas intrusivas de gran extensión) que cubre gran parte del occidente del estado es de fines del Cretácico. También hay algunos afloramientos de rocas ígneas extrusivas (basaltos) intercalados con las rocas sedimentarias en una relación compleja.

Del Terciario, hay derrames de rocas ígneas extrusivas que sobreyacen en forma discordante a las rocas sedimentarias del Cretácico.

La mayoría de los tipos de suelo formados por depósitos aluviales lacustres, palustres y litorales que se presentan en la zona costera de Colima, corresponden al Cuaternario. En el estado se conocen yacimientos de hierro, y en el estado funciona sólo una fábrica de cal hidratada, pero en la zona costera del estado se obtiene el 27% de la producción nacional de sal común (INEGI, 2000).



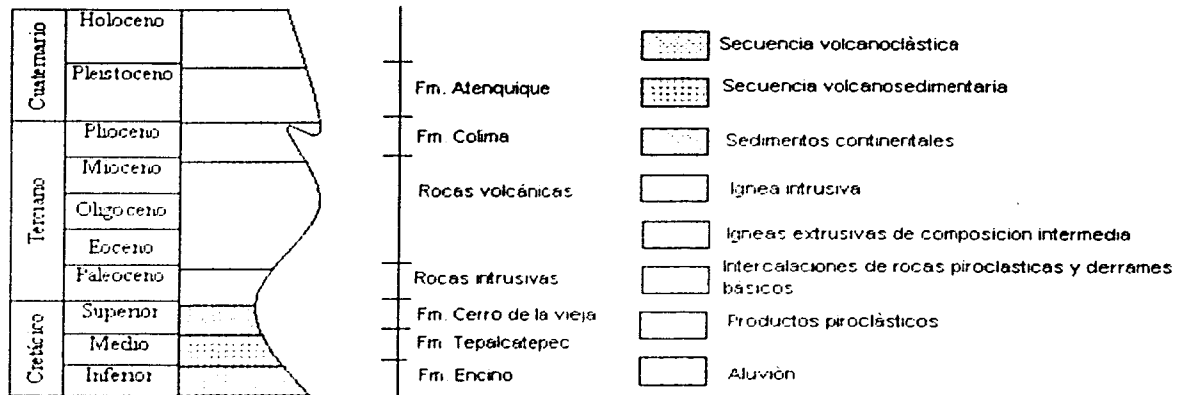


Figura 4.3.2.1 Columna estratigráfica del área del OVC (modificada de la Monografía Geológica-Minera del Estado de Colima, 1994).

### 4.3.3 Exploración magnética

En las instalaciones del Observatorio Vulcanológico de Colima (OVC), se realizaron dos levantamientos magnéticos, el primero de ellos llevado a cabo el día 2 y el segundo el día 3 del mes de noviembre del año 2001.

Para hacer este estudio se requirió de un magnetómetro, utilizándose uno de la marca Geometrics modelo G-856 de precesión protonica. Y como base fue utilizado otro magnetómetro Geometrics G-856, que se encuentra como estación en el Observatorio Vulcanológico de Colima, en ambos magnetómetros el parámetro medido fue F.

El terreno que denominamos como Colima 1 consta de una malla de puntos que nos dan una figura rectangular de 90 x 50 metros, con un total de 134 datos, repartidos en 11 líneas, las estaciones tienen como espaciamento cinco metros, tanto entre líneas como entre estaciones de la misma línea. Dicho terreno abarca la parte central y sur del predio del OVC y atraviesa perpendicularmente el edificio de las oficinas.

Llamaremos Colima 2 al terreno que resulta del segundo levantamiento, tiene dimensiones de 40 x 25 metros, consta de 9 líneas, con un total de 54 estaciones. El espaciamento entre líneas y estaciones al igual que en el terreno anterior fue de cinco metros. Abarca la porción noroeste del predio del OVC.

### 4.3.4 Resultados

En las figuras 4.3.4.1 y 4.3.4.2 se presentan los resultados de los procesos para Colima 1 y Colima 2, respectivamente, con el mismo formato que se ha manejado durante el presente trabajo, es decir, en el caso (a) campo total, caso (b) anomalía total magnética, caso (c) reducción al polo magnético de la anomalía y por último el caso (d) presenta el gradiente horizontal de la anomalía total.

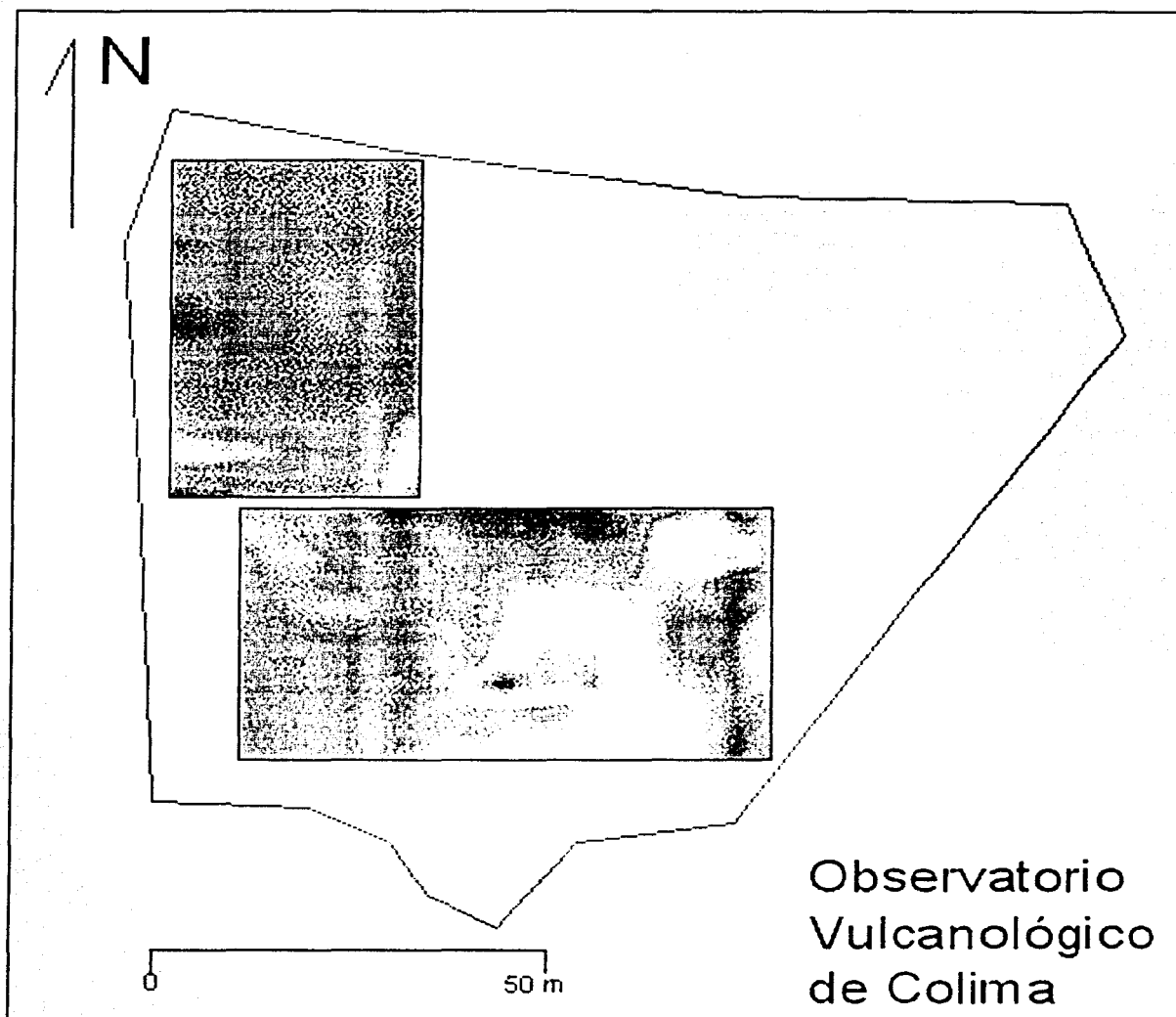


Figura 4.3.3.1 En este mapa se muestra la ubicación de los terrenos levantados en el OVC

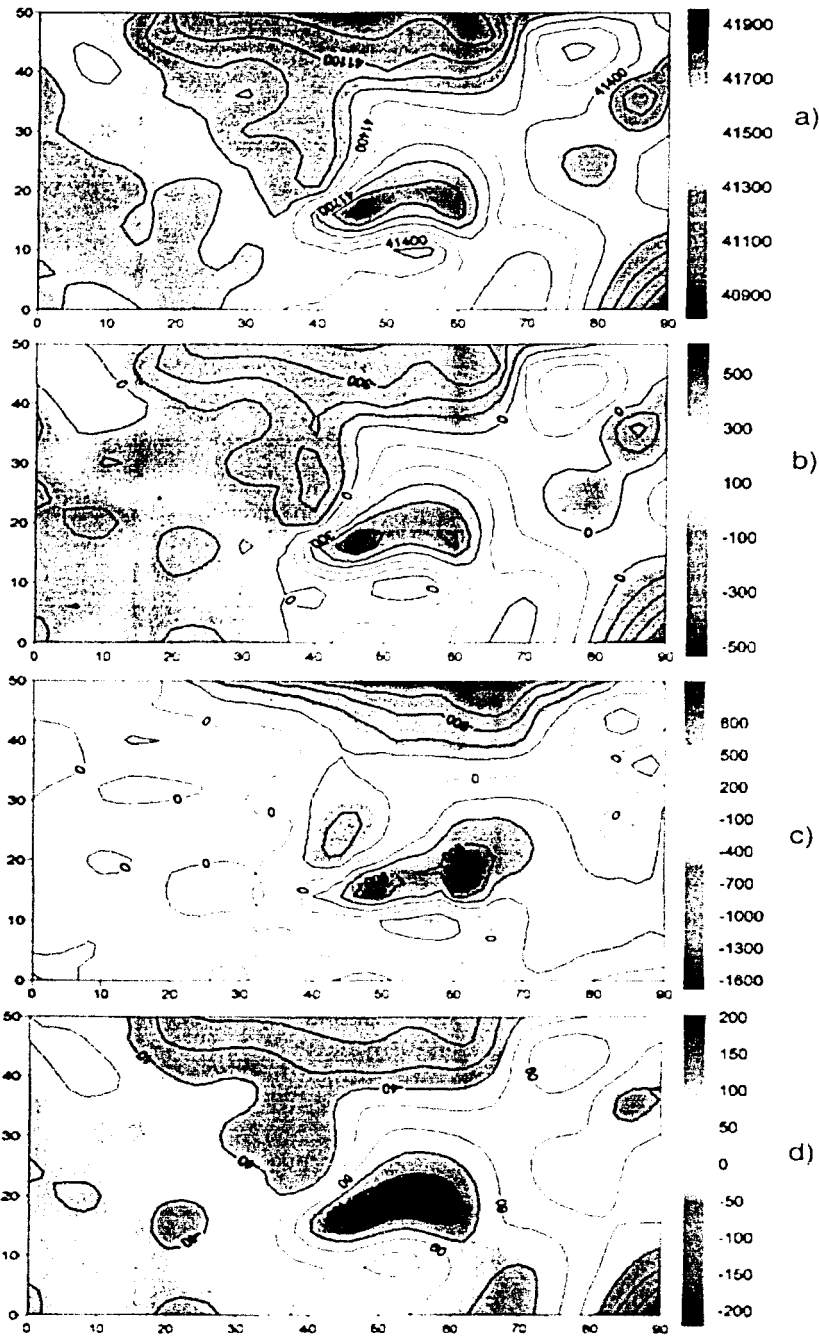


Figura 4.3.4.1 Colima 1 (a) Mapa de Campo Total (curvas a cada 100 nT) (b) Mapa de Anomalia Magnética (curvas a cada 100 nT) (c) Mapa de Reduccion al Polo de la Anomalia (curvas a cada 300 nT) (d) Mapa de Gradiente Horizontal de la Anomalia (curvas a cada 50 nT). Las escalas estan dadas en nT.

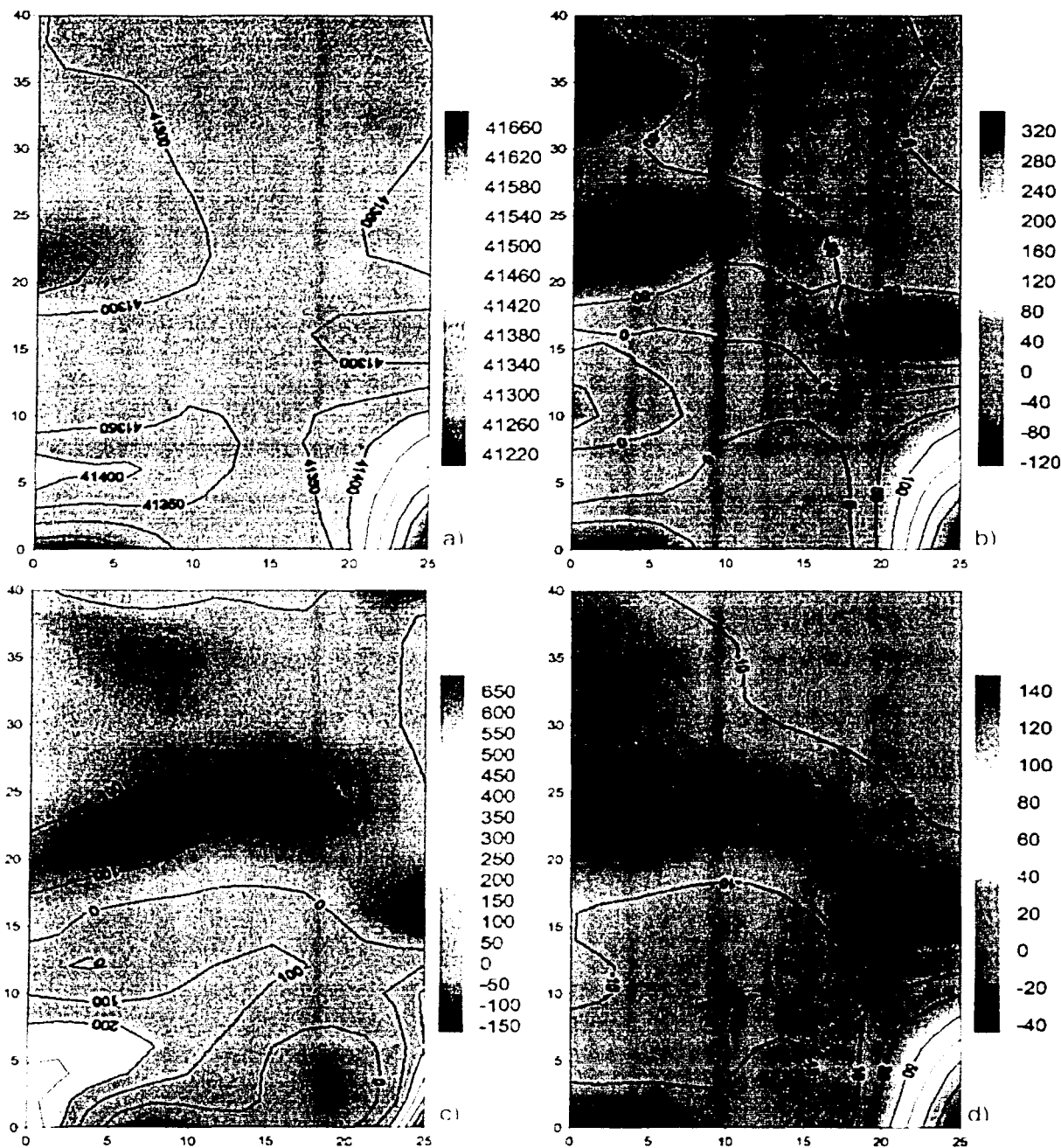
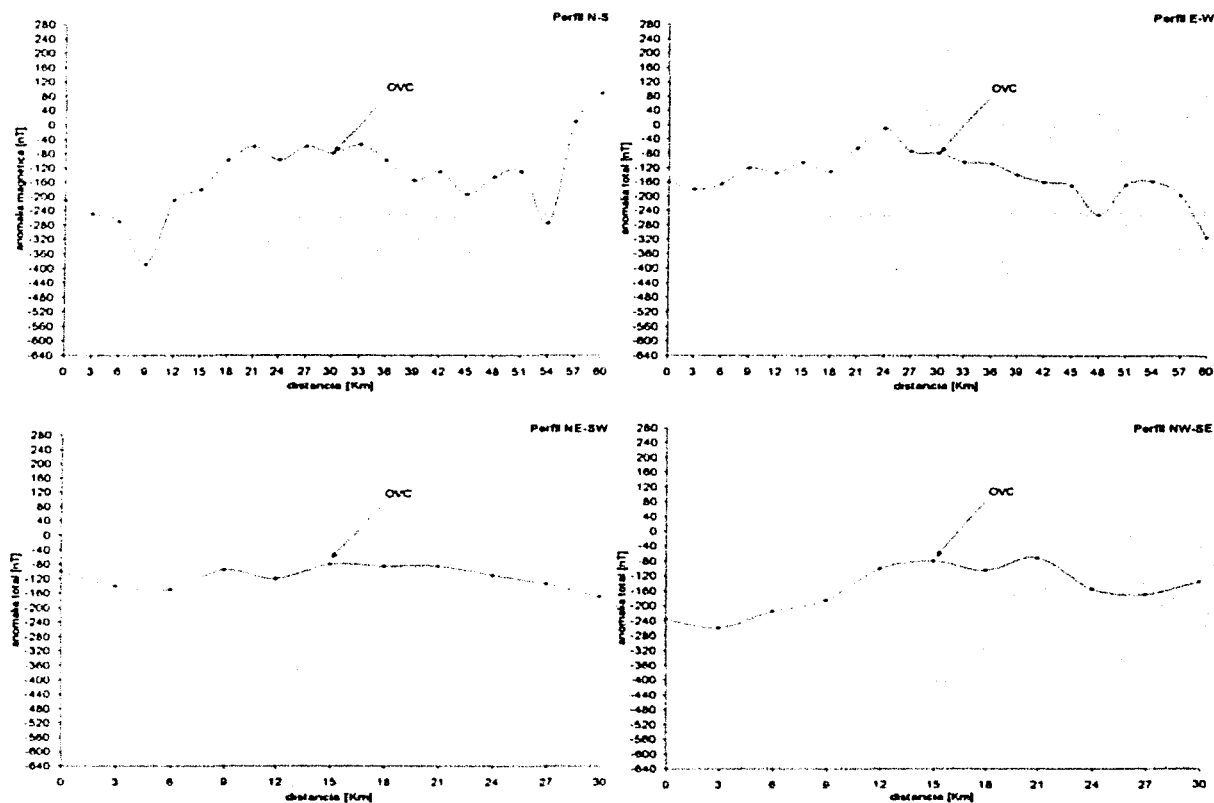


Figura 4.3.4.2 Colima 2 (a) Mapa de Campo Total (curvas a cada 50 nT) (b) Mapa de Anomalia Magnética (curvas a cada 50 nT) (c) Mapa de Reducción al Polo de la Anomalia (curvas a cada 100 nT) (d) Mapa de Gradiente Horizontal de la Anomalia (curvas a cada 20 nT). Las escalas están dadas en nT

Nuevamente para este caso se realizaron los cuatro perfiles tomando como centro al Observatorio Vulcanológico de Colima y se presentan a continuación.



#### 4.4 COENEO

##### 4.4.1 Ubicación y situación geográfica

El Observatorio de Centelleo Interplanetario (OCI), está ubicado en el Estado de Michoacán de Ocampo, aproximadamente a unos 60 Km al oeste de Morelia (ver mapa 4.4), en la parte centro-occidental del país, las coordenadas extremas de dicho estado son: al norte 20°24', al sur 17°55' de latitud norte; al este 100°04', al oeste 103°44' de longitud oeste. El estado de Michoacán de Ocampo representa aproximadamente el 3% de la superficie del país y colinda al norte con Jalisco, Guanajuato y Querétaro de Arteaga, al este con Querétaro de Arteaga, México y Guerrero, al sur con Guerrero y el Océano Pacífico y al oeste con el Océano Pacífico, Colima y Jalisco.

La región en donde se ubica el OCI, tiene un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura media anual va de 16 a 24°C, y la precipitación promedio anual para la región esta entre 700 a 800mm, pero puede ser hasta 1000mm. Se encuentra en una zona en la que se pueden encontrar abundantes matorrales, pero principalmente es una zona agrícola.

En lo que toca a la red de caminos y carreteras, el estado cuenta con una red amplia, que comunica al mismo con la capital de la República, con la del Estado de México, pero principalmente une a sus principales poblaciones.

El ferrocarril es el complemento a esta red y a través de este medio de comunicación se moviliza una parte importante de las cosechas que se producen en las zonas agrícolas del norte y centro de la entidad, además, se recibe de otras regiones una amplia gama de productos que no se obtienen en ella. La navegación aérea tiene gran importancia en el estado, ya que muchas localidades no poseen vías de comunicación terrestre, debido a lo accidentado de su territorio. Hay aeropuertos en Morelia, Lázaro Cárdenas y Uruapan. Y debido a que es también un estado costero, no podía faltar la presencia marítima, en una de las desembocaduras del río Balsas se encuentra el puerto Lázaro Cárdenas, el cual da salida a los productos elaborados en la siderúrgica Lázaro Cárdenas-Las Truchas, además, sirve de desahogo, en parte, del movimiento de carga que se efectúa en los puertos de Manzanillo, Colima y Acapulco, Guerrero.

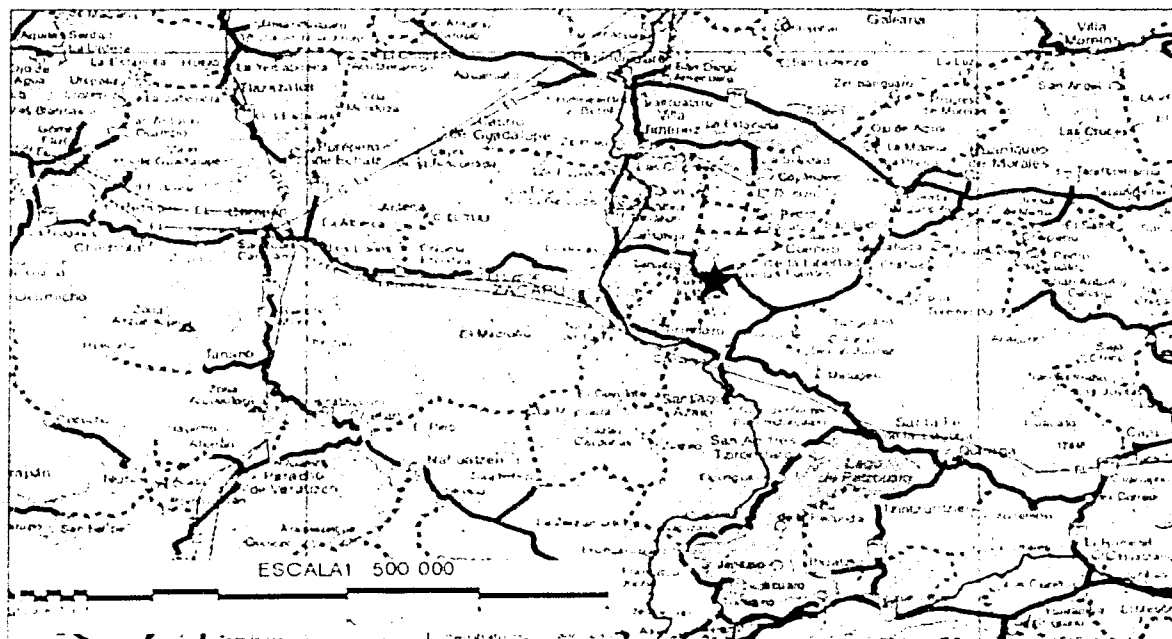


Figura 4.4

★ Observatorio de Centelleo Interplanetario

#### 4.4.2 Fisiografía y geología

El estado de Michoacán de Ocampo comprende a dos provincias fisiográficas, la del Eje Neovolcánico y la de la Sierra Madre del Sur. El OCI se encuentra ubicado en la provincia del Eje Neovolcánico que se le puede caracterizar como una gran masa de rocas volcánicas de diversos tipos, acumulada en innumerables y sucesivos episodios volcánicos iniciados desde mediados del Terciario hasta el presente. La zona está integrada por grandes sierras volcánicas y coladas lávicas

Otro rasgo esencial de la provincia lo constituyen las amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos, como: Pátzcuaro, Cuitzeo, Totolcingo, entre otros, o por depósitos de lagos antiguos: Zumpango, Chalco, Xochimilco, y otros.

En esta región se localiza casi la totalidad de la cuenca del río Lerma, pues sólo quedan fuera de ella los afluentes que proceden de la Mesa del Centro. Específicamente el OCI se localiza en la subprovincia de Sierras y Bajíos Michoacanos (INEGI, 2000).

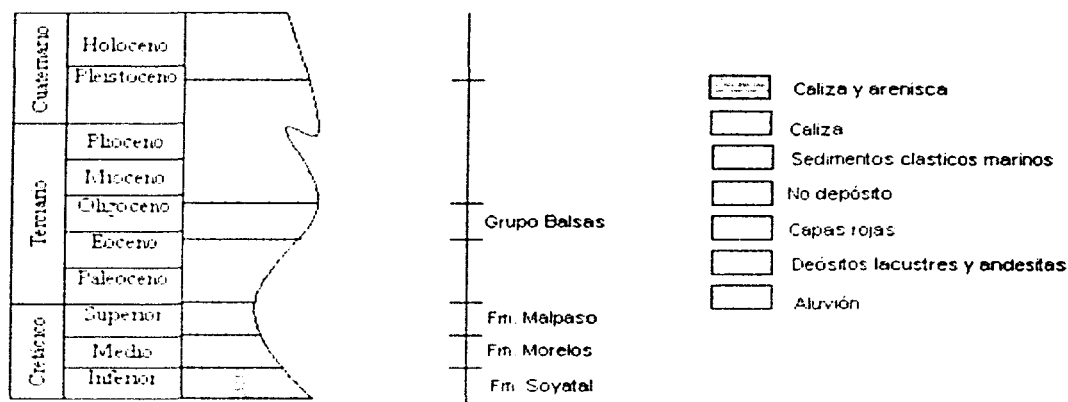


Figura 4.4.2.1 Columna estratigráfica del área del OCI (modificada de López Ramos, 1979).

#### 4.4.3 Exploración magnética

En las instalaciones del Observatorio de Centelleo Interplanetario, se realizó un levantamiento magnético, dicho estudio fue realizado el día 1 de junio del año 2002.

En este caso el magnetómetro utilizado en el levantamiento fue un magnetómetro de la marca Scintrex, modelo Envi-Mag, de precesion protónica. El terreno de estudio es denominado como Coeneo, lo conforman cuatro líneas, con 10 metros entre cada estación y una separación de ocho metros entre líneas. Teniendo como resultado una malla rectangular con 47 datos, el parámetro medido durante este estudio fue F. Este terreno está ubicado en la parte noreste del predio de dicho observatorio y sus dimensiones son de 110 x 24 metros.

Los datos fueron corregidos por variación diurna con los datos reportados por el Observatorio Magnético de Teoloyucan, obtenidos del magnetómetro Geometrics modelo G-856.

#### 4.4.4 Resultados

La figura 4.4.4.1 nos muestra el resultado de los procesos aplicados a los datos que conforman el terreno denominado como Coeneo, y de igual forma que en los casos previos se tienen cuatro mapas, el mapa (a) se refiere al campo total (F), el mapa (b) se muestra la anomalía total magnética, en el mapa (c) se presenta la reducción al polo de los datos y en el mapa (d) el gradiente horizontal de la anomalía magnética.

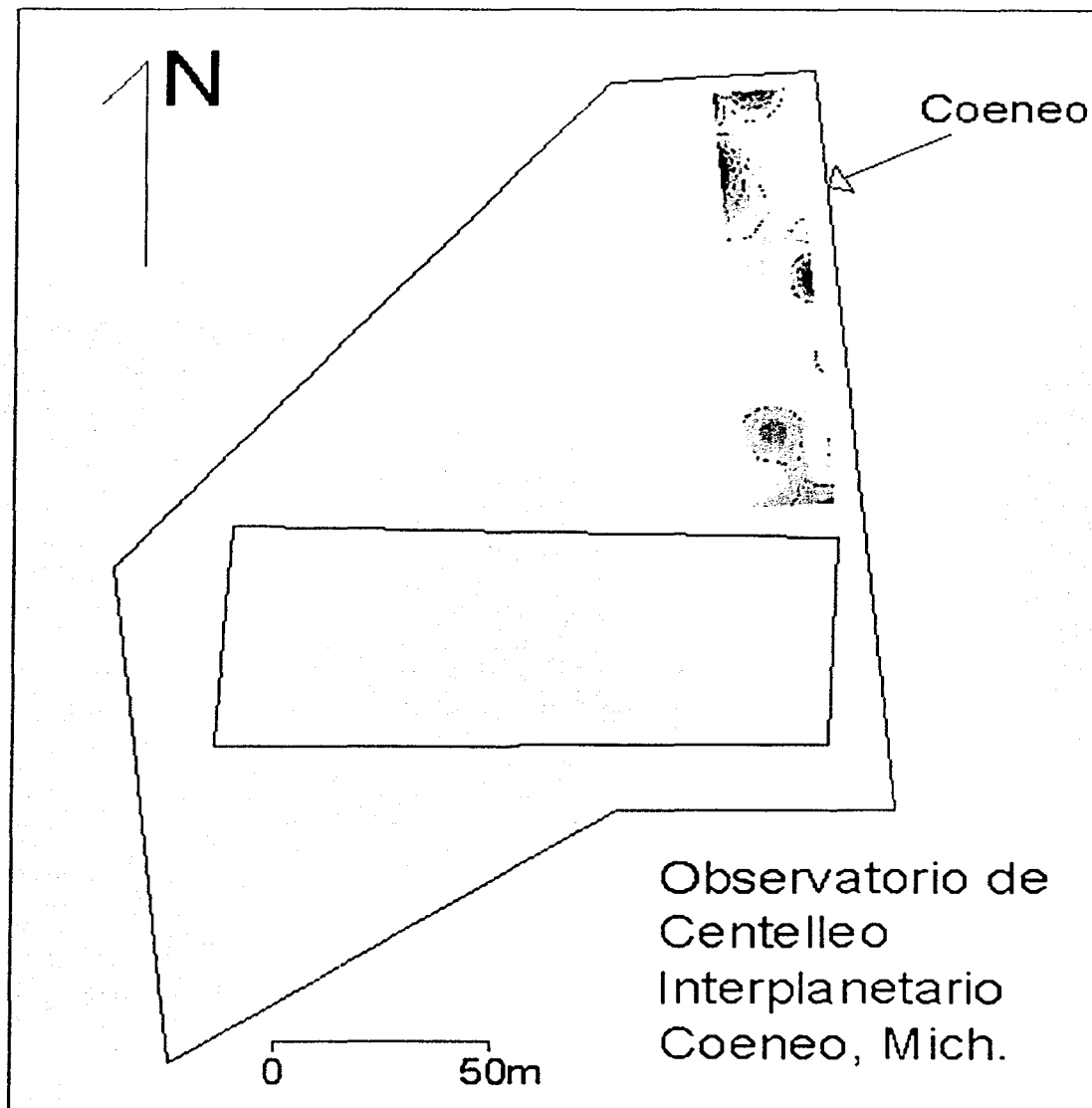


Figura 4.4.3.1 En este mapa se muestra la ubicación del terreno levantado en el OCI.



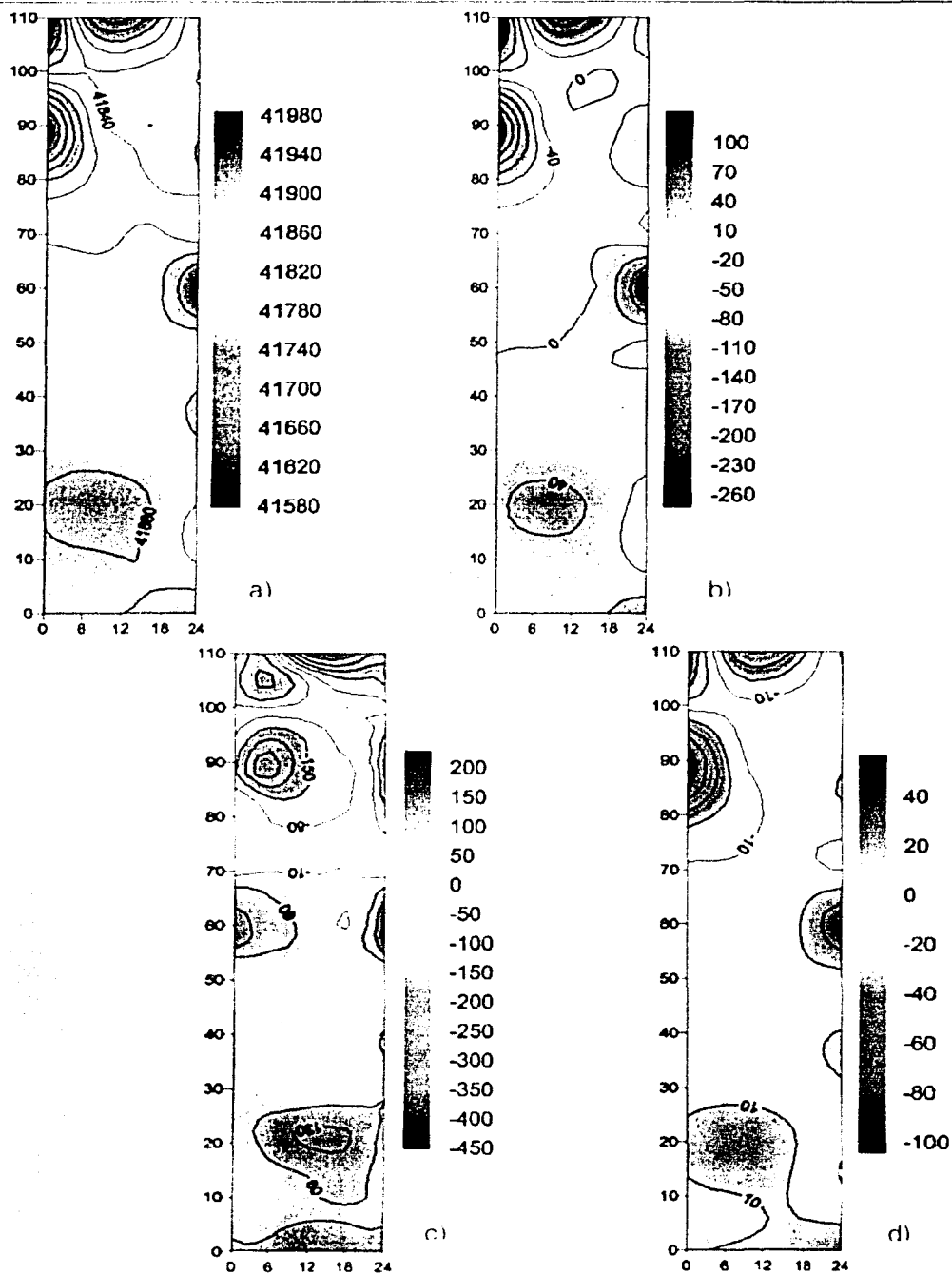
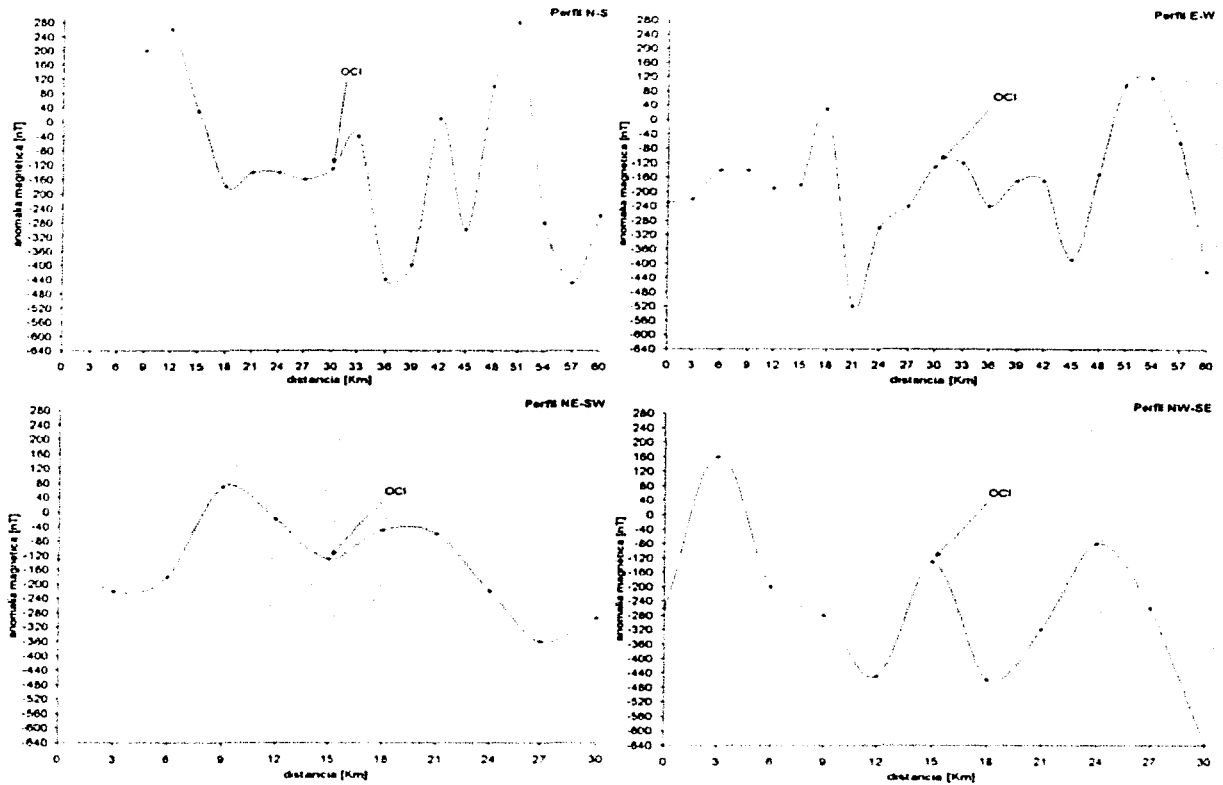


Figura 4.4.4.1. Coeneo (a) Mapa de Campo Total (curvas a cada 40 nT). (b) Mapa de Anomalia Magnética (curvas a cada 40 nT). (c) Mapa de Reduccion al Polo de la Anomalia (curvas a cada 70 nT) (d) Mapa de Gradiente Horizontal de la Anomalia (curvas a cada 20 nT) Las escalas estan dadas en nT

Por último se presentan los perfiles correspondientes a este sitio, también se realizaron cuatro perfiles en dirección N-S, E-W, NW-SE y NE-SW con centro en el Observatorio de Centelleo Interplanetario.



Finalmente se presenta una tabla con los valores calculados, para la declinación e inclinación magnéticas, a partir de las mediciones realizadas en campo el mismo día de los levantamientos magnetométricos. Dichos valores son necesario en el procesado de los datos (reducción al polo) y por lo tanto un parámetro requerido por el software de procesado.

	<b>Declinación magnética</b>	<b>Inclinación magnética</b>
Teoloyucan	6.4°	47.8°
Juriquilla	6.5°	48.4°
Colima	7.2°	46.3°
Coeneo	7.35°	47.35°

## 5. EMPLAZAMIENTO Y OPERACIÓN DE UN OBSERVATORIO MAGNÉTICO ESTÁNDAR

### 5.1 MATERIALES Y EQUIPOS

Cuando se planea la caseta de mediciones absolutas y la casa para los variómetros, se debe tener cuidado en la elección de los materiales para la construcción. Los ladrillos fabricados en hornos son inadecuados ya que son magnéticos. La madera, piedra caliza o arenisca son algunos materiales que pueden ser usados en las construcciones. Los modernos materiales térmicos, que hoy en día son mucho más usados en las construcciones de casas habitacionales y que se encuentran con gran variedad en el mercado, podrán, si es posible, ser usados no solo para cubrir el interior de las paredes si no también para las estructuras. La fijación de las puertas, ventanas y persianas, podrán ser hechas con bronce o aluminio. Los pernos de las bisagras son usualmente de acero, y también los seguros, los cuales podrán ser sustituidos por materiales no magnéticos como los ya mencionados.

Otra cuestión durante la planeación es qué tan grande debe ser el lugar en donde se encontrarán los instrumentos, esto depende del número de instrumentos que se piensen instalar, teniendo en consideración que en un futuro se puedan colocar más equipos, por eso es recomendable tener separadas las casetas para una mejor operación, se puede empezar con una sola unidad y agregar más unidades después, dependiendo de las circunstancias de operación.

#### 5.1.1 Magnetómetro fluxgate de tres componentes (DMI)

En el capítulo 2, se habló del principio del magnetómetro Fluxgate, para nuestro caso hacemos la descripción del equipo utilizado en este trabajo.

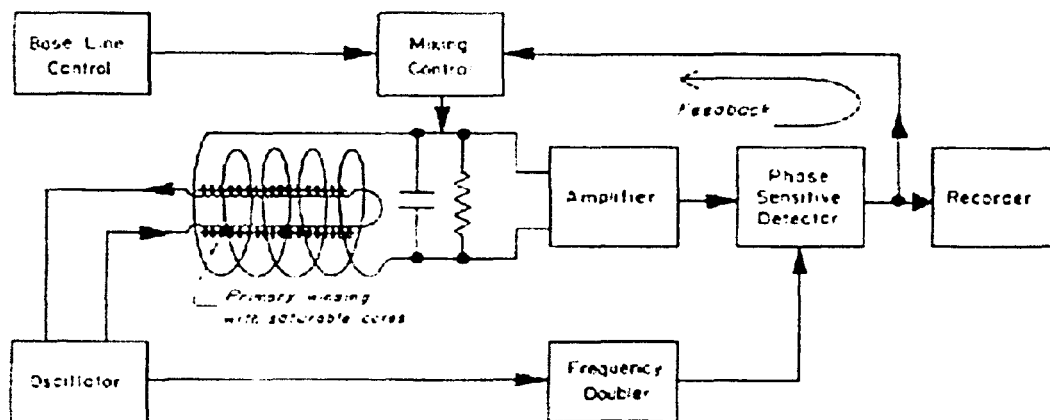


Figura 5.1.1.1 Magnetómetro fluxgate para mediciones direccionales de campo (Campbell W. H.).

El magnetómetro DMI de tres componentes, fue desarrollado en el Danish Metereological Institute para el uso en observatorios magnéticos estándar que requieren de una buena estabilidad en largo tiempo. Los sensores están colocados en un cubo para una mejor estabilidad mecánica, las componentes del vector de campo geomagnético que mide este instrumento son D, H y Z o X, Y y Z dependiendo de la orientación del cubo.

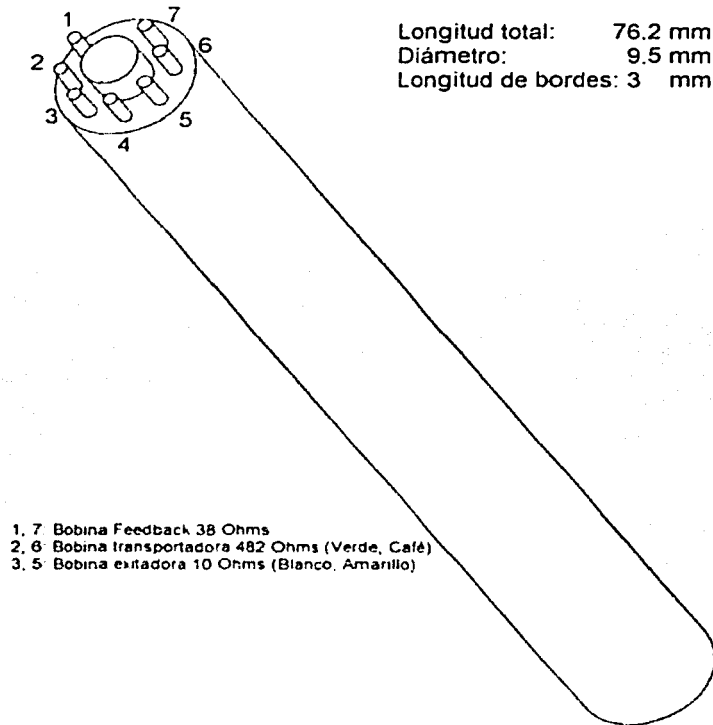


Figura 5.1.1.2. Sensor fluxgate (Tomado de Fluxgate Magnetometer Electronics Type FLM1/a, Manual del usuario).

También, en algunos modelos de este tipo, el cuarzo sirve de compensador de vientos y de pequeños cambios de temperatura. La electrónica puede ser colocada cercana al magnetómetro siempre y cuando se tenga un control de temperatura.

Más de 120 instrumentos son operados en observatorios magnéticos y en estaciones de variación. Los sensores de este magnetómetro son del tipo feed-back, el cual está montado sobre un pilar de concreto siguiendo las especificaciones mencionadas en el capítulo 2.

Especificaciones:

Salida Análoga.	$\pm 10$ V.
Salida digital opcional.	16 bits Convertidor AD.
Ruido.	50 pT RMS
Desalineamiento de los sensores.	$< 7^\circ$ o 2 mrad.
Requerimientos de energía	10-18 VCD.

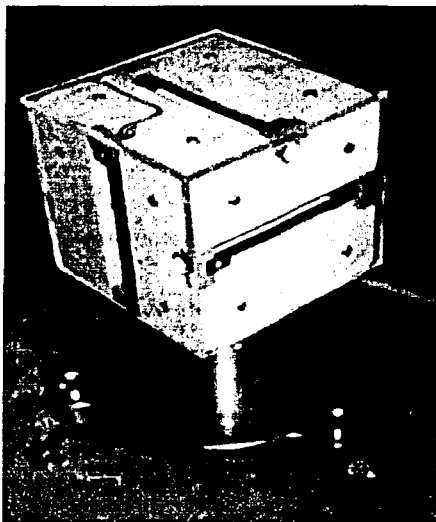


Figura 5.1.1.3. Magnetómetro fluxgate de tres componentes (DMI), en operación.

### 5.1.2 Magnetómetro geometrics G-856

En el capítulo 2 se describimos el principio de los magnetómetros ppm, para nuestro caso utilizamos el magnetómetro G-856, aquí describimos las particularidades de este magnetómetro.

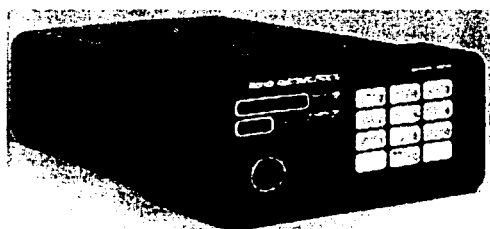


Figura 5.1.2.1 Magnetómetro Geometrics G-856

El G-856 es un magnetómetro, como ya se dijo, con tecnología de precesión protónica, es usualmente utilizado en levantamientos de campo, para el caso del observatorio, será utilizado para el monitoreo de la

componente total del campo en un solo punto, esto para el monitoreo de la variación diurna del campo geomagnético, está fabricado para que no influyan en la medición diferentes variables como son la temperatura o el lugar de trabajo. Almacena mas de 5000 de lecturas, puede ser programado para grabaciones automáticas en intervalos regulares. Todas las operaciones del magnetómetro son controladas desde el panel frontal, las conexiones son usadas para el sensor y para la salida de los datos. La salida es a través de un puerto RS-232 y es recibida por una computadora. Físicamente el magnetómetro G-856 es compacto, ligero y puede trabajar en amplios rangos de temperatura, la energía para este magnetómetro es proporcionada por nueve baterías tamaño D, suficiente para la lectura de unas 3000 grabaciones o con energía externa como es requerido en el observatorio.

Las especificaciones y la forma de programación para el Magnetómetro G-856 se encuentran en el Anexo 3.

### **5.1.3 Magnetómetro DI-FLUX (declinómetro e inclinómetro)**

Es un teodolito con un sensor tipo fluxgate para realizar mediciones de declinación D e inclinación I, con la capacidad de medir ángulos verticales y horizontales, este magnetómetro es portátil. No es un magnetómetro para realizar levantamientos de campo, solo para hacer mediciones en un punto de las componentes ya mencionadas del campo geomagnético. El sistema proporciona una rápida, acertada y conveniente medida de la declinación y la inclinación del campo geomagnético, consiste en un teodolito de material no magnético con un sensor tipo fluxgate colocado paralelamente y sobre la mira del teodolito, este a su vez va conectado a una tarjeta electrónica (del mismo tipo que la tarjeta Ad77 del magnetometro de tres componentes) mediante un cable tipo serial y conexiones RS-232, la cual cuenta con un voltímetro con display para visualizar la medición de la componente respectiva del campo geomagnético, la resolución con la que cuenta este magnetometro es de 0.1 nT con un rango de +/- 200 nT, funciona con una batería de 12 voltios de DC, con una duracion de aproximadamente 50 horas ininterrumpidas de uso. Este magnetometro cuenta con un switch de tres posiciones, la primera es el off del instrumento, la segunda es la lectura del voltaje de la batería y la tercera es para la medición de D e I. Para el caso del observatorio se monta sobre un pilar de concreto el cual garantiza que la medición de la declinación y la inclinación en un mismo punto, cuando este magnetómetro es usado en campo, se utiliza un trípode de materiales no magnéticos.

El teodolito cuenta con dos vernieres, uno horizontal y el otro vertical, cada uno de estos cuenta con dos ventanas para la observación de las lecturas de posición del teodolito, en la horizontal son llamadas A y B, y el vertical I y II, estos vernieres, están graduados en grados y tienen una resolución de 15 segundos. Para la calibración del instrumento, cuenta con dos niveles burbuja, uno en el vernier horizontal y el segundo en el vernier vertical, la nivelación se consigue mediante el giro de las 3 patas, que son tornillos los cuales permite que suba o que baje el teodolito.

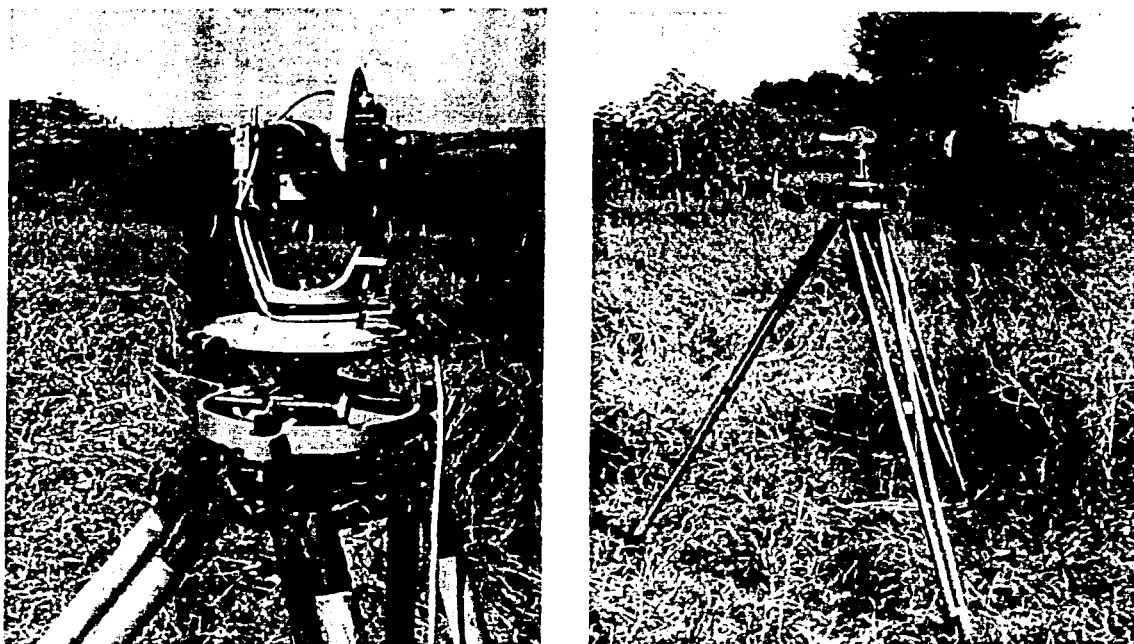


Figura 5.13.1. Panorámica del magnetómetro DI-FLUX en trabajo de campo.

## 5.2 TARJETA Ad77

Se cuenta con una tarjeta electrónica modelo Ad77 para la adquisición de los datos, que fue diseñada y construida por el Royal Meteorological Institute of Belgium para Latinoamérica, y que ha sido probada ya en diferentes observatorios de Latinoamérica y por supuesto en el Observatorio Magnético de Teoloyucan, obteniéndose resultados satisfactorios. Dicha tarjeta cuenta con 7 canales de comunicación, con 2 bytes por cada canal, que nos asegura una muy buena resolución en los datos (de 16 bits). Transmite datos aproximadamente a cada 5 segundos y la transmisión es siempre de todos los canales, estén en uso o no.

Es importante hacer notar que la tarjeta Ad77, recibe los datos del magnetómetro y tiene la posibilidad de hacer un preproceso de los datos, pero no almacena, transmite estos datos a un sistema de almacenamiento, que puede ser una computadora. La tarjeta está preprogramada y en dicho programa se dan los parámetros para hacer funcionar la tarjeta electrónica, recibir, en su caso procesar, y transmitir los datos, pero es necesario que en la computadora que se tenga como sistema de recepción y almacenamiento se cuente con un software especial para recibir los datos y almacenarlos, hacer los procesos correspondientes y organizarlos.

A continuación se muestra un esquema descriptivo de la tarjeta Ad77, en el cual se muestran sus componentes principales:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

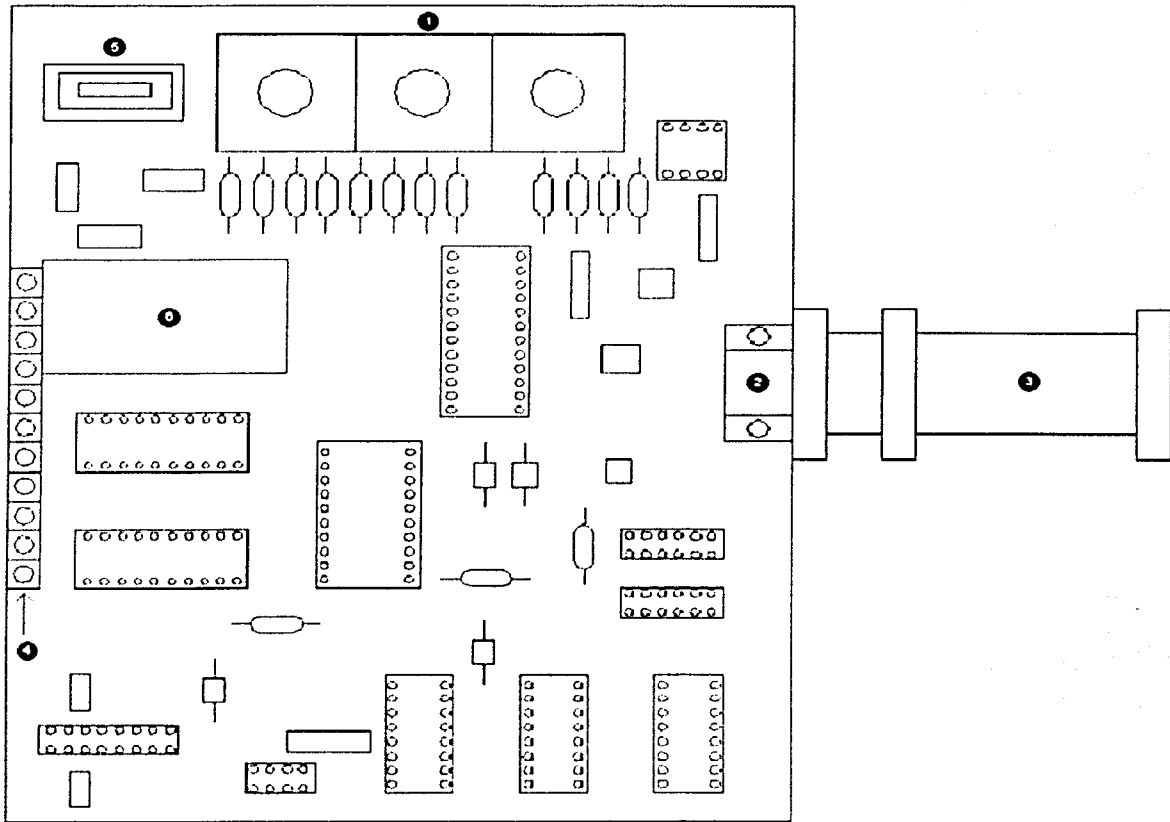
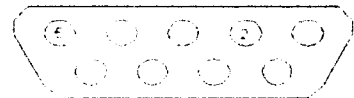


Figura 5.2.1. Diagrama esquemático de la tarjeta electrónica Ad77.

El número 1 indica los el *feed-back* del sensor de la componente F. El número 2 nos muestra que la Ad77 cuenta con un puerto DB9 de comunicación, con una conexión RS232 (como la que se muestra), en donde el pin 2 es utilizado para la transmisión y el pin 5 esta aterrizado. El componente marcado con el número 3 no es propiamente un componente de la tarjeta, es un mini módem conectado al puerto RS232 para darle ganancia a la señal, ya que la señal recorre casi cien metros. Con el número 4 esta marcado el bloque de tornillos para conexiones y canales, y en orden de aparición de abajo hacia arriba se tiene primero una tierra general, luego vienen los canales comenzando con el 6 y hasta llegar al 0, donde los canales 5, 4 y 3 pueden ser utilizados por un equipo y los canales 2, 1 y 0 por otro, simultaneamente. Los últimos dos tornillos son para la entrada de la corriente electrica (12 voltios). Con el numero 5 se marca una conexión de tres canales que es para los canales 0, 1 y 2, y puede optarse por usar esta conexión o la del bloque de tornillos. Finalmente el componente marcado con el número 6 es una de las partes fundamentales de la Ad77 y se trata de un convertidor analógico-digital.





Es de suma importancia el control de tiempo, como ya se mencionó la tarjeta transmite a intervalos de cinco segundos, para el registro de los datos vamos a asociar cada momento de transmisión a su correspondiente múltiplo de cinco segundos, tomando los valores de 0, 5, 10, o hasta 55 segundos. Como es de suponerse es difícil que exista coincidencia entre el momento en el que se puso en operación la tarjeta y un múltiplo de cinco segundos, por eso es que en el programa de la Ad77, se tiene un control de esto y se hace un centelleo cada 3 segundos para dar dicha asociación, esto es muy sencillo, si por ejemplo el centelleo fue en el segundo cero, éste se asociará al segundo cero, si es uno o dos, también se asociará al segundo cero, pero en el caso que el centelleo se presente en el segundo tres, en este caso se asociará al segundo cinco y así sucesivamente para cualquier instante que suceda el centelleo, con esto aseguramos los datos a exactamente cada cinco segundos.

### **5.3 SOFTWARE Ad77**

Para la adquisición y almacenamiento de los datos, se cuenta con un sistema que consta de la tarjeta electrónica Ad77 y un software diseñado para interactuar con ésta y una computadora. Dicho software está escrito en VISUAL BASIC, es muy versátil, su manejo es sencillo y es muy amigable. Esta es la versión 3.0 del programa.

Como se observa en la figura 5.3.1 se tiene un menú superior, en la parte de *Control* se tienen tres opciones: *Start*, *Stop* y *Exit*, para encender, detener y cerrar el software respectivamente. En la sección de *Options*, se tienen cuatro opciones: *View Plot*, *View Data*, *Settings* y *About*, las primeras dos son para presentar las pantallas, tanto la de la gráfica de los datos como la de los mismos datos. En *Settings* se despliega una nueva ventana para las opciones de configuración, y finalmente en *About* se presentan el nombre y versión del software, además de los créditos y direcciones de sus diseñadores y programadores.

En esta pantalla principal se presenta cómo está configurado el software (describiendo de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo), se observa el puerto de comunicación, el código del observatorio, un parámetro especial para el tipo de archivo, la hora, la ruta de almacenamiento de los archivos, un botón para transferir los datos y el indicador de estado de transferencia, los últimos datos transmitidos. Después podemos ver los últimos datos que llegan sin filtrar y después del filtrado, en la parte derecha se tienen un par de botones para observar las pantallas de datos y la de gráficos. Inmediatamente debajo esta la sección de las líneas base y los datos reportados, aquí se ve la configuración de los canales y sus valores de línea base correspondientes, el último encabezado y el último dato reportado. Todo esto en dos secciones, una para los canales del uno al tres y otra para los canales del cuatro al siete. Por último la sección de errores de entrada/salida, que nos muestra que errores y en dónde se localizan.

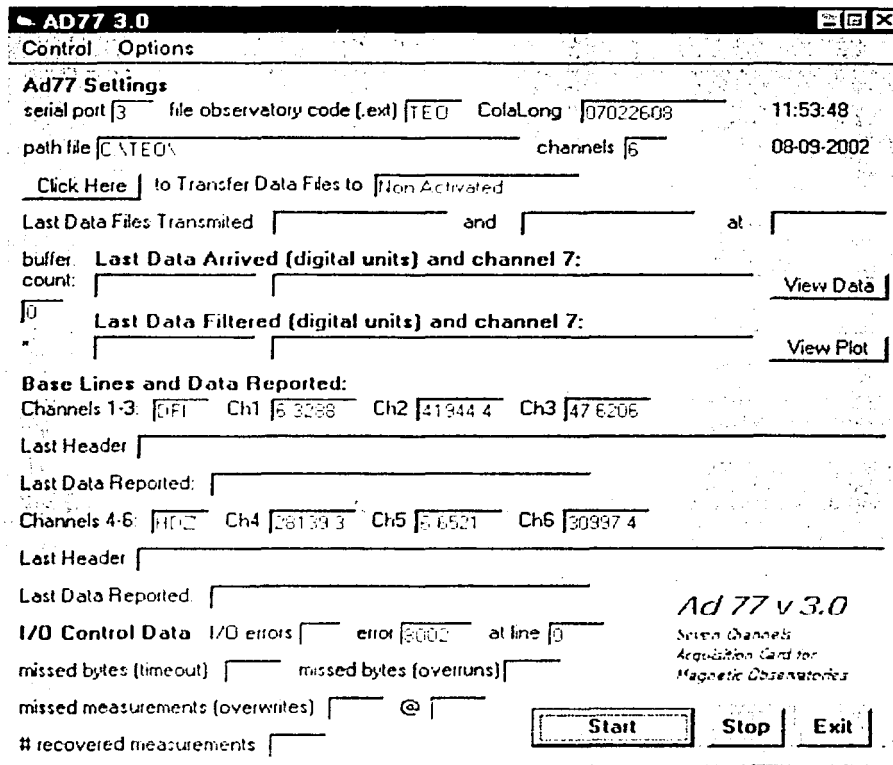


Figura 5.3.1. Pantalla principal del Software Ad77

La pantalla de *Settings*, que se muestra en la figura 5.3.2, nos da las opciones de configuración, en la parte superior izquierda podemos seleccionar el puerto por el cual se esta comunicando la computadora y la tarjeta Ad77, debajo de esta sección vemos que se puede seleccionar la extensión asociada al archivo de los datos y su formato, en la siguiente sección se elige el GIN al cual se hará la transmisión de estos datos y la última sección del lado izquierdo es para seleccionar el número de canales de entrada. En esta sección existe un botón, que al pulsarlo nos despliega una nueva pantalla para la configuración de los canales (como se muestra en la figura 5.3.3).

Siguiendo con la pantalla de *Settings*, la sección del lado derecho en la parte superior, es para seleccionar la ruta en la cual se almacenaran los archivos de los datos que se generan. Debajo en la siguiente sección se cuenta con la opción para transmitir dichos archivos via FTP y finalmente se tienen tres botones: *Accept*, *Cancel* y *Defaults*. Para aceptar o cancelar la acción y para dar los valores por default (respectivamente).

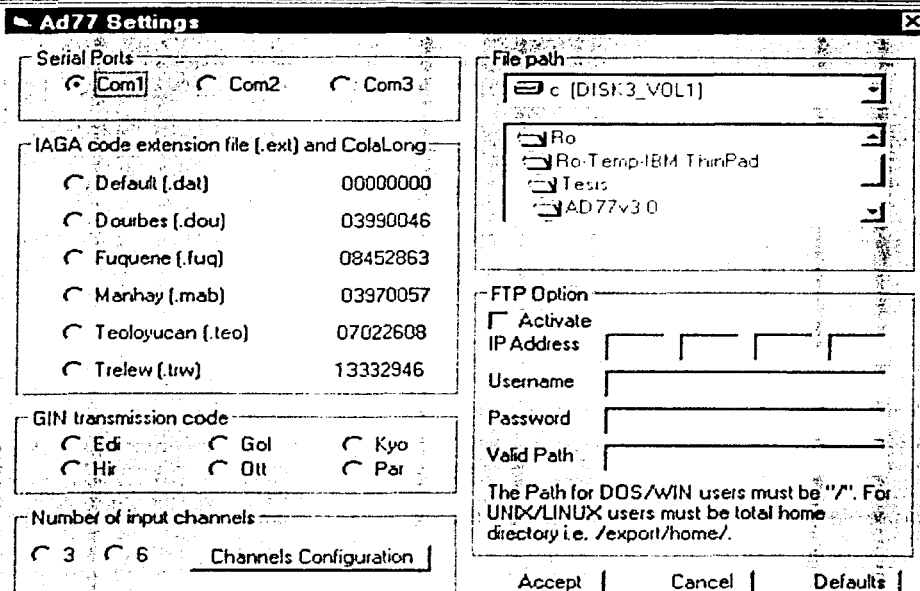


Figura 5.3.2. Pantalla de Settings del Software Ad77

Como se mencionó anteriormente, desde el menú superior de la pantalla principal del software existen un par de opciones para desplegar la pantalla de los datos y la del gráfico. La pantalla del gráfico (figura 5.3.4), despliega un par de gráficas, la superior se refiere los datos por minuto y puede desplegar hasta 24 horas de registro, mientras que la de la parte inferior se refiere a los datos cada cinco segundos, y podrá desplegar hasta dos horas de registro.

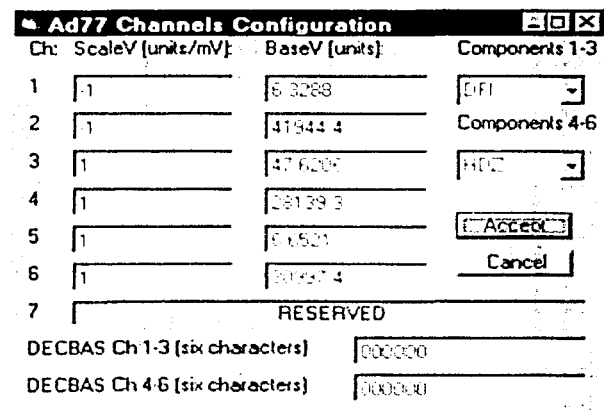


Figura 5.3.3. Pantalla de configuración de canales.

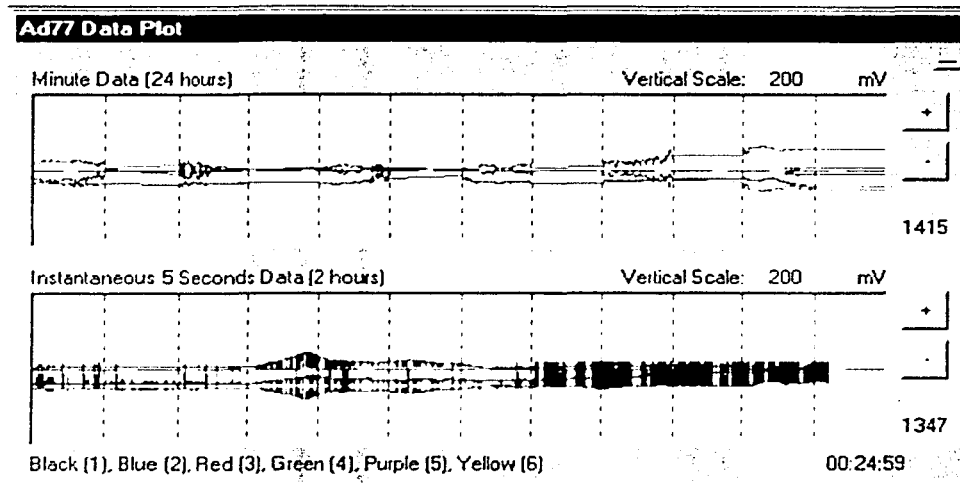


Figura 5.3.4.  
Pantalla de visualización de gráficas del Software Ad77.

La pantalla de los datos (figura 5.3.5), se despliegan los datos recibidos a cada cinco segundos (sin el filtro INTERMAGNET), aquí se ve que las primeras tres columnas se refieren a la hora, minuto y segundo del dato, y las siguientes (dadas en unidades digitales) se refieren a las variaciones registradas por el equipo y éstas serán acordes con la configuración que previamente se haya seleccionado.

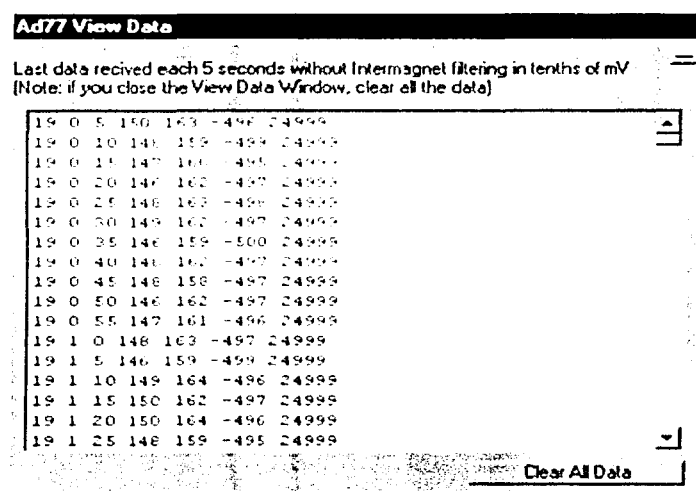


Figura 5.3.5. Pantalla para visualización numérica de los datos adquiridos.

#### 5.4 FORMAS DE REGISTRO

Las formas de registro se utilizan para llevar un control de las mediciones de declinación e Inclinación del campo geomagnético, es un tipo de formato con dos presentaciones, la primera presentación es en papel que se utiliza para realizar las mediciones con el magnetómetro DI-flux en el momento en que se llevan a cabo, la segunda presentación es una hoja de cálculo en donde se vacían los valores obtenidos de la primera

presentación de los datos adquiridos con el magnetómetro DI-flux, y agregando los valores de algunas componentes obtenidas con los magnetómetros utilizados en un observatorio magnético como son:

- La componente F con un magnetómetro PPM (en este caso el G-856).
- Las componentes F, D e I con el magnetómetro LAMA.
- Las componentes D, H y Z con el magnetómetro DMI.

#### **5.4.1 Protocolo de Observaciones Absolutas**

A continuación se describe el proceso para realizar una medición de declinación e inclinación así como el llenado de la forma de observaciones para el DI-flux y la descripción del formato de la hoja de cálculo, posteriormente se describe la forma de obtención del azimut de la marca y el cálculo para la obtención de H, D y Z a partir de las componentes D, F e I así como la forma de calcular los errores de Sonda, Sitio y Azimut.

El procedimiento para realizar la medición de la declinación "D" y de la inclinación "I" es simple y son basadas en el manejo de un teodolito universal geodésico capaz de proporcionar la medición de los ángulos horizontales y verticales. Para el caso del magnetómetro DI-flux el sensor se encuentra montado sobre la mira del teodolito, además se debe definir una marca, que se encontrará a una cierta distancia del pilar de observaciones, la cual se tendrá que observar al momento de realizar las mediciones, ésta debe ser la misma para todas las mediciones que se realicen en el pilar para garantizar que siempre se encuentre sobre el mismo azimut, la distancia entre la marca y el pilar de observaciones se define haciendo que el grosor de los hilos de la mira del teodolito sea casi del mismo grosor de la marca a la distancia, ya que si tomamos una distancia mayor o menor podremos tener efectos de visualización y las lecturas tendrán un mayor error al realizar las mediciones.

El primero paso es visualizar la marca con dos posiciones de la mira del teodolito, la primera posición es una observación directa y se lee el vernier horizontal en las dos ventanas (A y B) haciendo un promedio de las lecturas observadas, la segunda posición es inversa y se logra girando la mira 180° en sentido vertical y 180° en sentido horizontal para poder así observar la marca y nuevamente se toma la lectura del vernier observando las dos ventanas y realizando el promedio de las lecturas. Después se realiza el promedio de los dos promedios anteriores para así obtener un solo valor del azimut de la marca, a este valor lo llamaremos "M".

El siguiente paso es realizar las mediciones para el cálculo de la declinación magnética D, debemos contar con un reloj ajustado al horario GMT con resolución de un segundo, esto para anotar la hora en que se tomó cada una de las lecturas. En el formato se escribirá la hora, el minuto y el segundo, la medición se realiza con cuatro posiciones de la mira del teodolito que son:

- ED Este directa
- WI Oeste inversa.
- EI Este inversa
- WD Oeste directa.

Las posiciones se realizan haciendo giro de 180° en sentido horizontal y verticalmente dependiendo de la posición que se desee.

Para la medición "ED" se coloca el vernier vertical en donde se pueda observar por las ventanas I y II del vernier vertical, las lecturas de  $0^\circ$  y  $180^\circ$  respectivamente, esto para garantizar que la mira se encuentra en posición horizontal y por lo tanto el sensor fluxgate se encuentra en esta misma posición, ya teniendo esto, se enciende el magnetómetro con la perilla en la segunda posición, que es la posición en donde podremos observar la lectura en nT del la variación del campo geomagnético, para tomar la lectura, el sensor y el campo geomagnético deben ser perpendiculares entre sí, eso se obtiene cuando el producto punto de los vectores formados por el sensor fluxgate y el del campo magnético sea cero, de esta forma, en el display del magnetómetro, se observará la lectura con valor de cero o casi cercana a cero, tomando como tolerancia para la lectura  $\pm 0.5$  nT y con una duración dentro de este rango de 5 segundos, estas dos condiciones son necesarias para que la lectura se considere válida. Esto se consigue haciendo girar la mira en sentido horizontal, que se encontrará cercana a la posición en que se colocó la mira antes de encender el magnetómetro, las lecturas se obtienen observando las dos ventanas del vernier circular horizontal y realizando un promedio entre estas. En el formato se escribirá el ángulo, el minuto y el segundo de la ventana A y de la ventana B solo se escribirán los minutos y segundos.

Esto se realiza para las siguientes tres posiciones (WI, EI y WD), tomando la hora y realizando los promedios de las lecturas observadas en las ventanas del vernier horizontal. Con los cuatro promedios anteriores, se realiza un nuevo promedio entre estos ángulos para obtener un solo valor del ángulo de declinación, a este valor lo llamaremos "L". En el formato, se escribirá el valor del promedio, el promedio mas  $90^\circ$  y a este último mas  $180^\circ$ , estos dos últimos valores serán utilizados para realizar las mediciones de la inclinación I.

Al termino de las cuatro posiciones para la declinación se deberá efectuar la observación a la marca nuevamente, realizando el mismo procedimiento que se hizo al principio.

El cálculo de la declinación es mediante la formula:

$$D = L - (M - A_g)$$

En donde  $A_g$  es el azimut geografico, D es el valor de la declinación para los tiempos en que se realizaron las mediciones de L, considerando que  $L = (ED + WI + EI + WD) / 4$ .

Para el caso dela inclinación I, el procedimiento es similar, pero ahora en lugar de leer el vernier horizontal, se toma la lectura de los ángulos en el vernier vertical, las posiciones de la mira en que se deben tomar las lecturas son:

- ND Norte directa.
- SI Sur inversa.
- NI Norte inversa.
- SD Sur directa.

El primer paso es hacer un ajuste de los niveles del teodolito de ser necesario, y se procede con las mediciones, considerando que el vernier horizontal debe colocarse en el ángulo promediado de la declinación mas  $90^\circ$  para las posiciones ND y SI y este valor mas  $180^\circ$  para las posiciones NI y SD obtenidos en el cálculo de la declinación, el concepto para realizar estas mediciones es el mismo que el de la declinación, las lecturas

en el display se encontrarán cercanas a cero cuando las componentes vectoriales entre el campo y del sensor fluxgate sean perpendiculares.

**5.4.1.1 Formato para el DI-flux**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
 Instituto de Geofísica  
 Servicio Magnético Nacional  
 Formulario de Observaciones Absolutas para DI-flux y Registro de Vanógrafos

Fecha (d/m/a)	Estación	Observador	DI-flux
Observación #		Azimut de la mira	
Antes			
Mano Anormal		Después	
Declinación (D)	Inclinación (I)	LAMA D	DMI D
Distancia		+90	+180
Lecturas en mV			
Inclinación (I)	LAMA I	DMI I	PPM I

Las cuatro posiciones medidas para la declinación D y para la inclinación I, sirve para compensar la desalineación entre el eje magnético del sensor fluxgate y el eje óptico de la mira y además para compensar la distancia entre el sensor y la mira.

Los datos adicionales que se encuentran en el formato, se obtienen de las mediciones de los magnetómetros G-856, LAMA y DMI.

### 5.4.1.2 El formato electrónico

Los datos de la hoja de registro para el magnetómetro DI-flux, se capturan en la hoja de cálculo, esta hoja contiene fórmulas para realizar los cálculos y obtener los promedios de la hora en que se realizó la medición, el promedio para las cuatro posiciones de declinación e inclinación

La descripción de la hoja de cálculo la describimos en tres partes, la primera son las celdas en las que se capturan los datos obtenidos con el magnetómetro DI-flux y la segunda corresponde a los datos obtenidos por los otros magnetómetros y en la última parte las celdas que realizan los cálculos para conocer la declinación e Inclinación magnética.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following structure:

- Row 1:** Title "Estación".
- Row 2:** "Fecha (d, m, a)", "Estación", "Observador".
- Row 3:** "Observación", "Área", "Marca Aparental", "Actual de marca", "Tiempo".
- Row 4:** "Valores de paso" section with fields for D.LAMA, LAMA, DCLAS, LCLAS, ZCLAS.
- Row 5:** "Observaciones Absolutas y Líneas Base" section with fields for LAMA, DMI, CLAS.
- Row 6:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 7:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 8:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 9:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 10:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 11:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 12:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 13:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 14:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 15:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 16:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 17:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 18:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 19:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 20:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 21:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 22:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 23:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 24:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 25:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 26:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 27:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 28:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 29:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 30:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 31:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 32:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 33:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 34:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 35:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 36:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 37:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 38:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 39:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 40:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 41:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 42:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 43:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 44:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 45:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 46:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 47:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 48:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 49:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.
- Row 50:** "B.VALOR" section with fields for B.VALOR, B.VALOR, B.VALOR.

- Fecha (d, m, a), se escribe la fecha en que se realizó la observación con el día, mes y año.
- Estación, se escribe el nombre de la estación en donde se realizan las mediciones, en este caso las observaciones se realizaron en la estación Coeno.
- Observador, en esta celda se escribe el nombre de la persona que realizó las mediciones.



- DI-flux, se escribe el número de registro del instrumento, esto para saber con cual DI-flux se realizó la medición.
- Observación #, se escribe el número de la observación, en algunos casos se realizan varias mediciones en un mismo día, es por ello que se necesita el control de la observación.
- Azimut de marca, es el azimut de la marca obtenido con mediciones astronómicas, en el cual se pueden realizar con el Sol o con las estrellas, si la marca no cambia este valor será constante para todas las observaciones, en el caso de que desapareciera por algún motivo se tiene que realizar una nueva medición astronómica.
- Marca Azimutal, esta compuesta por cuatro bloques, los dos primeros son la para la visualización de la marca antes de realizar las mediciones de las cuatro posiciones de la declinación, registrando los grados, minutos y segundos de las ventanas (A y B) del vernier horizontal, con las observaciones directa e inversa respectivamente, Los dos últimos son para la visualización de la marca después de realizar las cuatro observaciones para la declinación, igualmente una observación directa y otra inversa.
- Declinación (D), esta compuesta por dos bloques, el primero para registrar la hora en que se realiza la medición, escribiendo la hora, el minuto y segundo, el segundo para el registro de las cuatro posiciones para el calculo de la declinacion, escribiendo los grados, minutos y segundos obtenidos del vernier horizontal en las ventanas A y B.
- Inclinación (I), También esta compuesta por dos bloques al igual que en la declinacion, la primera para registrar hora de la medicion y el segundo para escribir los valores de los ángulos medidos en el vernier vertical para las cuatro posiciones correspondientes.
- LAMA D, DMI D y CLAS D. son los valores obtenidos de los otros magnetómetros para las horas en que se realizaron las mediciones de las cuatro posiciones para el cálculo de la declinación, se observa que para la celda CLAS D. que corresponde al valor de la declinacion del instrumento clásico, solo tomamos una lectura, ya que el registro es análogo en papel fotografico y para el intervalo de tiempo en que se realiza la medicion resulta impractico obtener mas de una lectura.
- LAMA I, DMI H, Z y CLAS H, Z para los dos primeros magnetometros se obtiene el valor de sus respectivas componentes del registro en la computadora para el tiempo en que se realizaron las mediciones, para CLAS se obtienen los valores del registro analogo para las componentes H y Z, de igual forma solo tenemos un valor por el mismo motivo que se menciono anteriormente.
- Promedio, estas celdas contienen formulas que realizan el promedio de las lecturas obtenidas en las cuatro posiciones para el calculo de la declinacion, en las siguientes celdas se realiza la suma del promedio mas 90° y en la siguiente el valor anterior más 180°.
- Int. Total (F) nT, los valores de Variog se obtienen del variografo LAMA que es el que nos da la componente F en el cuarto de Variografos y en Poste F se escribe el valor de la componente F proporcionada por el magnetometro G-856.
- Prom. Es el promedio de las cuatro mediciones anteriores para el variógrafo y el PPM.
- Azimut cero, en esta celda se calcula el valor del azimut de la marca al pilar de observaciones, en sistema decimal, mediante las lecturas de la Marca Azimutal.

- Valores de escala, estos valores son los que hacen que la señal recibida sea amplificada y nos dé cómo resultado el valor real de la señal.
- Observaciones absolutas y líneas base, en esta parte se compone de cuatro bloques en la hoja de cálculo, aquí se realizan los cálculos para determinar los valores de la hora en sistema decimal para la declinación e inclinación obtenidas de las cuatro posiciones respectivamente y también por las componentes H y Z. En el primer bloque se hace el cálculo en sistema decimal de la declinación y de su línea base para el magnetómetro LAMA y el cálculo e la línea base de la declinación para los magnetómetros DMI y CLAS, en el segundo bloque se hace el cálculo en sistema decimal de la inclinación y su línea base, esto para el magnetómetro LAMA, en tercer bloque se realiza el calculo en sistema decimal de H y su línea base para el magnetómetro DMI y la línea base de la componente H para el magnetómetro CLAS y por último, en el cuarto bloque se hace el cálculo en sistema decimal de la componente Z y su línea base para el magnetómetro DMI y de la línea base de Z para el magnetometro CLAS.
- Errores, en estas celdas se realiza el cálculo de los errores de Sonda en nT, de Sitio y de Azimut para la declinación D y para la inclinación I.
- Lectura a/d baliza, Aquí se realiza el cálculo de los promedios de la baliza antes de realizar las mediciones para el cálculo de la declinación y después de realizar las mediciones, en segundos.

#### **5.4.2 Azimut astronómico de referencia**

El primer paso para la operación de un observatorio magnético, es hacer el cálculo del azimut de la marca, esto es esencial ya que todas las mediciones que se realicen en el observatorio magnético estarán referidas a la posición del pilar de observaciones absolutas.

Como ya se menciono, esto se realiza mediante la observación del Sol o de las estrellas, para nuestro caso, se realizaron mediante la observacion del Sol. El equipo necesario para esto es un teodolito con el cual obtendremos los ángulos horizontales necesarios para dicho calculo.

El procedimiento para realizar el calculo del azimut de la marca es el siguiente:

- a) Se posiciona el tripie que soporta al teodolito sobre la marca ya establecida, se coloca el teodolito y se realiza la nivelación pertinente, para que cumpla con las condiciones de operación geodesicas del instrumento.
- b) Se realiza la observacion a la marca a distancia que previamente fue seleccionada, la cuál fue descrita en el capítulo 2 y se observa en la figura 2.2.1.6, esta tiene que ser la misma para todas las mediciones que se realicen en dicho observatorio, con la finalidad de garantizar la misma posición del punto, las observaciones a la marca se realizan en dos posiciones: directa e inversa y realizando un promedio entre ambas.
- c) El siguiente paso es realizar la observacion al Sol, en donde también se realizaran las observaciones: directa e inversa, este procedimiento consiste en tomar el ángulo horizontal en el momento en que el Sol se encuentre centrado en los hilos de la mira del teodolito,

registrando la hora con precisión al segundo con el formato UT, para dicha observación el teodolito cuenta con un filtro solar y así poder observar al sol por medio de la mira.

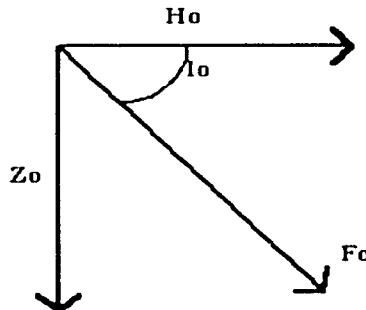
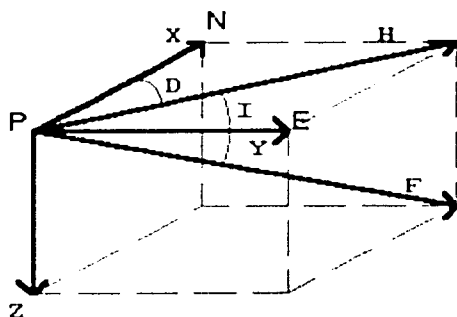
- d) Después de lo anterior, nuevamente tenemos que observar a la marca a distancia para disminuir el error de la lectura de los ángulos.
- e) Con estos datos y consultando el almanaque astronómico, se puede determinar el azimut astronómico de la marca.

Durante el procedimiento de cálculo nos ayudamos de los programas que existen en la página web del Astronomical Applications Department del U.S. Naval Observatory que es la versión web del programa MICA para obtener el azimut de la marca (U.S. Naval Observatory).

### 5.4.3 Cálculo de H, D, y Z a partir de D, F e I

A continuación se muestra el procedimiento para realizar la obtención de las componentes H, D y Z a partir de las componentes D, F e I.

Tomamos como referencia las componentes del vector de campo geomagnético.



Sabemos que:

$$H = F \cos I$$

$$Z = F \sin I$$

Que son obtenidas a partir de:

$$F = F_0 + \Delta F$$

$$I = I_0 + \Delta I$$

También sabemos que  $D = D_0 + \Delta D$ .

Y de la figura anterior obtenemos:  $Z_0 = F_0 \sin I_0$

$$H_0 = F_0 \cos I_0$$

También sabemos que cada componente del vector de campo geomagnético se define por su línea base y de su incremento.

En donde:

$F_0$ ,  $D_0$  e  $I_0$  Son las líneas base de las componentes

$\Delta$  son los incrementos de las componentes.

Por lo que tenemos:

$$H = (F_0 + \Delta F) \cos(I_0 + \Delta I)$$

y

$$Z = (F_0 + \Delta F) \sin(I_0 + \Delta I)$$

Pero  $\Delta i$  y  $\Delta d$  se registran en nT y nuestro registro final de  $\Delta I$  y  $\Delta D$  debe ser en grados [°], entonces el cálculo lo realizamos de la siguiente forma.

Consideramos que:

$$\Delta I = \sin^{-1} \left( \frac{\Delta i}{F_0} \right)$$

$$\Delta D = \cos^{-1} \left( \frac{\Delta d}{H_0} \right)$$

Además de:

$$\Delta \times \Delta = 0$$

$$\sin \Delta = \Delta$$

$$\cos \Delta = 1$$

$$\sin^{-1} \Delta = \Delta$$

Los  $\Delta$  son muy pequeños para que las consideraciones anteriores se cumplan.

Y utilizando las siguientes identidades trigonométricas.

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta$$

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta$$

Tenemos

$$H = (\Delta F + F_0) \cos(\Delta I + I_0)$$

$$H = (\Delta F + F_0) (\cos \Delta I \cos I_0 - \sin \Delta I \sin I_0)$$

$$H = (\Delta F + F_0) (\cos I_0 - \Delta I \sin I_0)$$

$$H = \Delta F \cos I_0 - \Delta F \Delta I \sin I_0 + F_0 \cos I_0 - F_0 \Delta I \sin I_0$$

$$H = H_0 + \Delta F \cos I_0 - \frac{\Delta i}{F_0} F_0 \sin I_0$$

$$H = H_0 + \Delta F \cos I_0 - \Delta i \sin I_0$$

en donde las unidades de  $H$  son en [nT].

$$D = \Delta D + D_0$$

$$D = \cos^{-1} \frac{\Delta d}{H_0} + D_0$$

$$D = \frac{\Delta d}{H_o} + D_o \text{ este resultado es en radianes, por lo que hacemos la conversión a grados.}$$

$$D = \frac{\Delta d \times 180}{\pi H_o} + D_o \text{ las unidades de } D \text{ son en grados } [^\circ].$$

y finalmente obtenemos a  $Z$  de la siguiente forma.

$$Z = (\Delta F + F_o) \sin(\Delta I + I_o)$$

$$Z = (\Delta F + F_o)(\sin \Delta I \cos I_o + \cos \Delta I \sin I_o)$$

$$Z = \Delta F \Delta I \cos I_o + \Delta F \sin I_o + F_o \Delta I \cos I_o + F_o \sin I_o$$

$$Z = Z_o + \Delta F \sin I_o + F_o \frac{\Delta I}{F_o} \cos I_o$$

$$Z = Z_o + \Delta F \sin I_o + \Delta I \cos I_o$$

las unidades de  $Z$  son en [nT].

#### 5.4.4 Error de sonda, error de sitio y error de azimut

Es necesario realizar el cálculo de los ángulos entre la dirección del sensor fluxgate y la óptica del teodolito, así como el arreglo de la electrónica del fluxgate.

Para determinar la desalineación, las observaciones de las lecturas en las cuatro diferentes posiciones de los valores observados de  $D$ , en donde las ecuaciones son las siguientes:

$$\text{Error de sonda } ESO = H \cdot \sin \left[ \frac{2\pi}{360} \frac{ED - WI - EI + WD}{4} \right]$$

$$\text{Error de sitio } ESI = -3600 \cdot \frac{ED + WI - EI - WD}{4 \tan I}$$

$$\text{Error de azimut } EAZ = 3600 \cdot \frac{ED - WI - EI + WD}{4}$$

El error de sonda  $ESO$  y el error de sitio, los podemos calcular también desde las observaciones para la inclinación con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Error de sonda } ESO = F \cdot \sin \left[ \frac{ND - SI + NI - WD}{4} \right]$$

$$\text{Error de sitio } ESI = \frac{ND + SI - NI - SD}{4} \cdot 3600 \text{ y por último}$$

$$\text{Gradiente de } I \Delta I = \frac{ND - SI - NI + SD}{2} \cdot 3600$$

### 5.5 RESULTADOS DE MEDICIONES ABSOLUTAS

Los valores que se presentan a continuación corresponden a las mediciones absolutas realizadas en el pilar que está ubicado en el Observatorio de Centelleo Interplanetario en Coeneo, Michoacán, para los días 9 de febrero y 16 de julio de 2002, en la primera columna se muestra el número de medición realizada, en la segunda se muestra el tiempo al que esta referida dicha medición (en horario UT), el siguiente dato es la lectura del ángulo a la marca y la cuarta columna se refiere al azimut astronómico calculado. A continuación se presentan los valores de la declinación y la inclinación magnéticas con resolución de un segundo, seguidos de los valores de las componentes total (F), horizontal (H) y vertical (Z), los tres dados en nT.

Además se presentan los valores para las componentes D, I, H, Z y F obtenidos a partir del IGRF, para el día de la medición.

9 de febrero del 2002

#	I	Mark	Az M	D	I	F (nT)	H (nT)	Z (nT)
1	17:49:30	28°55'19"	23°35'00"	6°35'53"	47°35'30"	41855	28227	30904
2	18:27:30	28°53'37"	23°35'00"	6°37'35"	47°42'15"	41852	28165	30957
3	19:18:00	28°56'11"	23°38'30"	6°31'31"	47°30'49"	41850	28266	30862
4	19:46:30	28°56'19"	23°40'00"	6°29'53"	47°31'15"	41848	28261	30864

Valores del IGRF  
 (International Geomagnetic Reference Field)

D =	7°22.9	
I =	47°22.6	
H =	28369	(nT)
Z =	30827	(nT)
F =	41894	(nT)

16 de julio del 2002

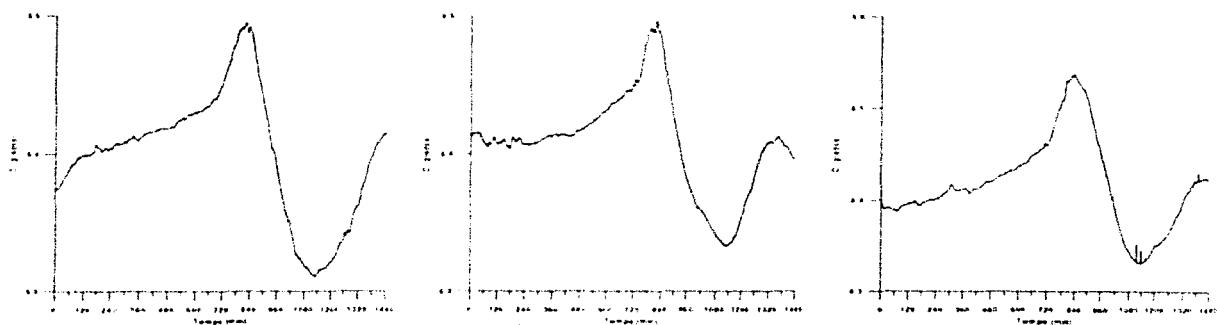
#	I	Mark	Az M	D	I	F (nT)	H (nT)	Z (nT)
1	14:29:00	229°13'45"	172°22'56"	6°41'13"	47°29'30"	41837	28268	30841
2	14:50:00	229°14'52"	172°23'19"	6°40'32"	47°28'41"	41836	28276	30834

Valores del IGRF  
 (International Geomagnetic Reference Field)

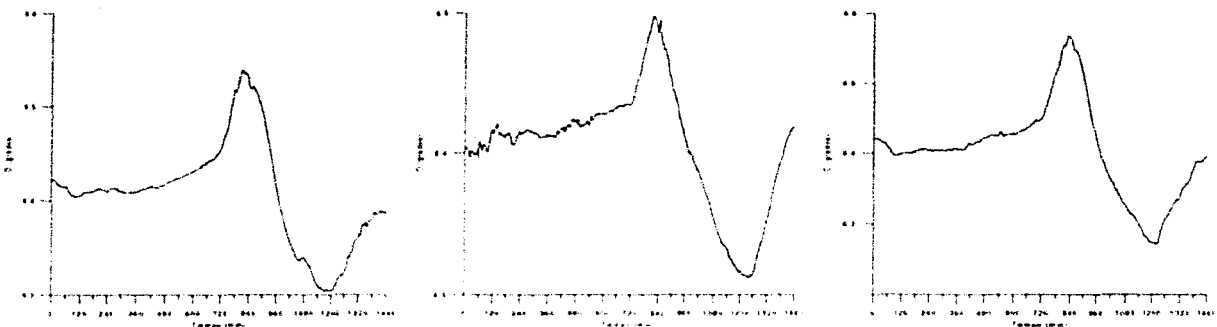
D =	7°21.8	
I =	47°23.4	
H =	28344	(nT)
Z =	30814	(nT)
F =	41868	(nT)

### 5.6 MAGNETOGRAMAS DEL DMI

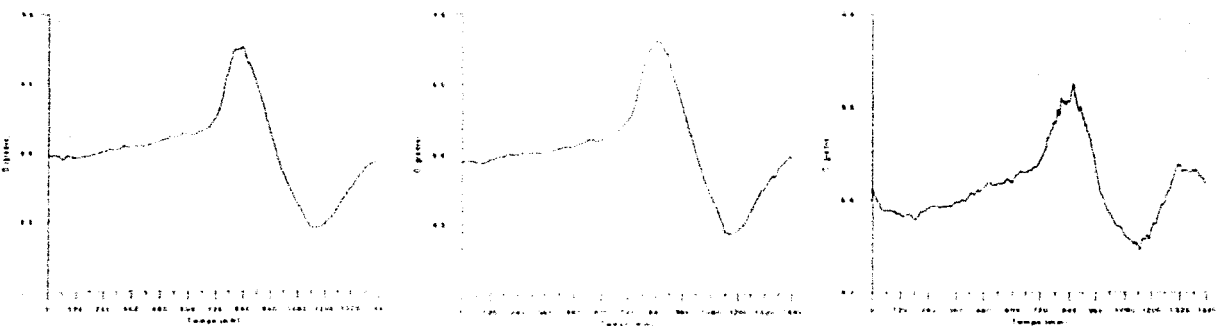
Ahora se presentan los magnetogramas obtenidos del DMI, para las tres componentes que está midiendo, la declinación magnética D, la componente horizontal H y la componente vertical Z. De acuerdo con el índice internacional de días quietos y días perturbados, publicado por el Geo Forschungs Zentrum Postdam de Alemania, para los diez días quietos y cinco días perturbados del mes de agosto del año 2002 (Geo Forschungs Zentrum Postdam).



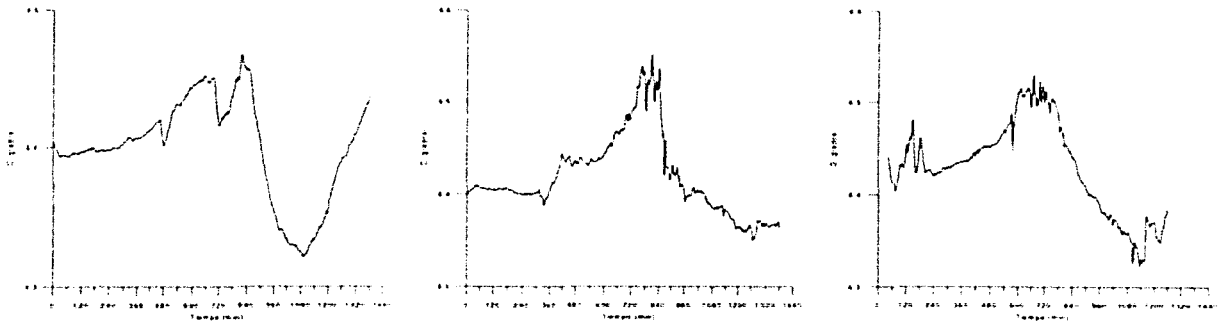
Declinación magnética (D) para los días 5, 6 y 7 de agosto (días quietos).



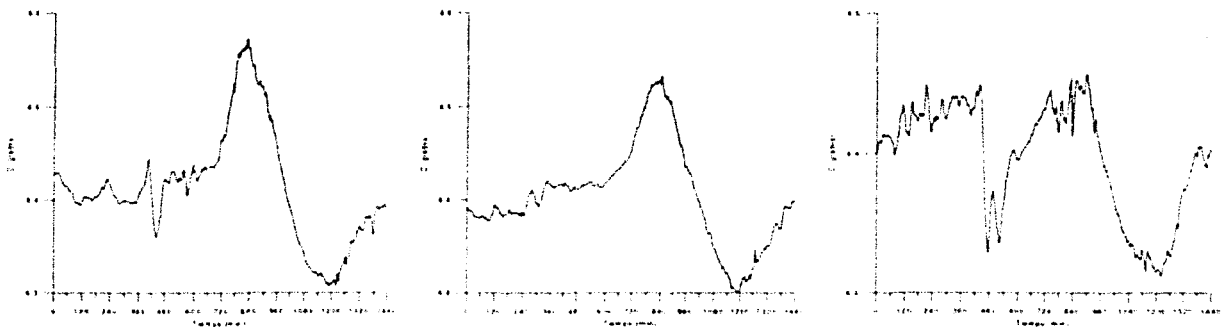
Declinación magnética (D) para los días 8, 22 y 23 de agosto (días quietos).



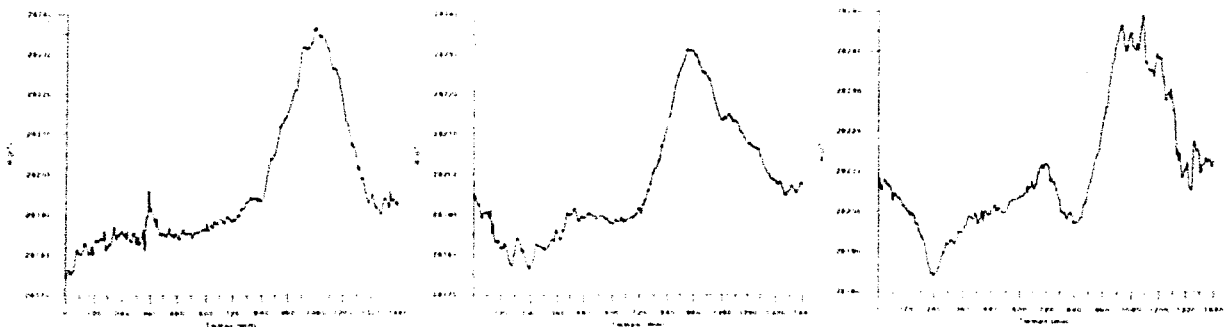
Declinación magnética (D) para los días 24, 25 y 28 de agosto (días quietos).



Declinación magnética (D) para los días 31 (día quieto), 1 y 2 de agosto (días perturbados).

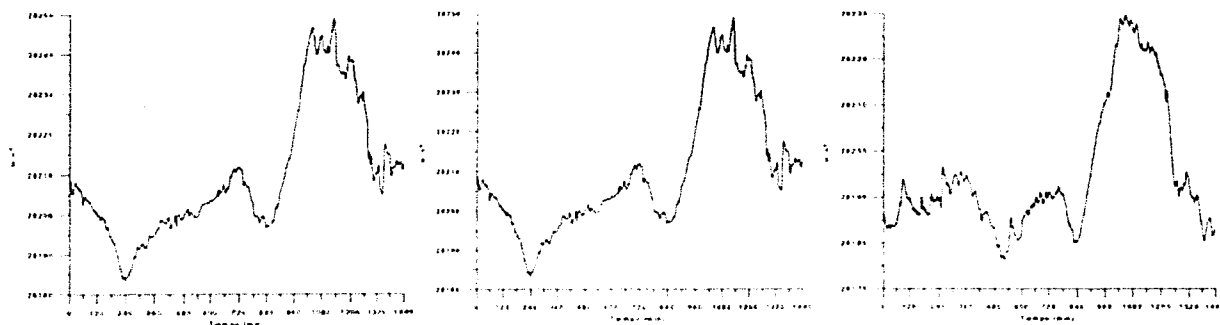


Declinación magnética (D) para los días 19, 20 y 21 de agosto (días perturbados).

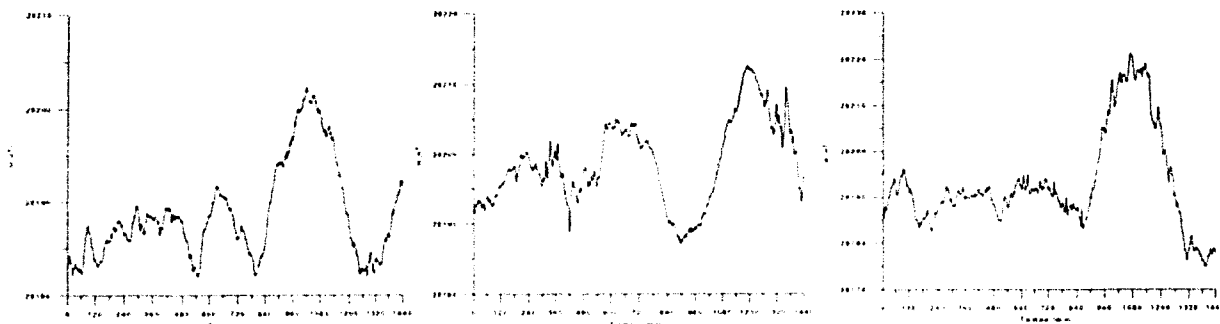


Componente horizontal (H) para los días 5, 6 y 7 de agosto (días quietos).

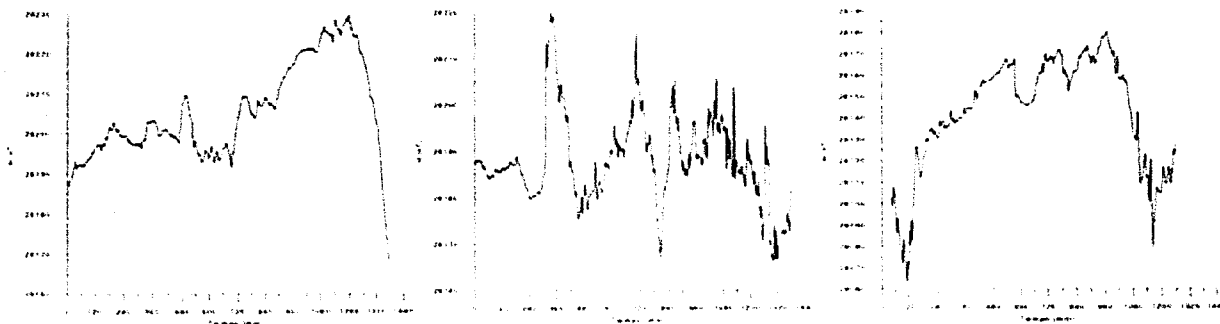




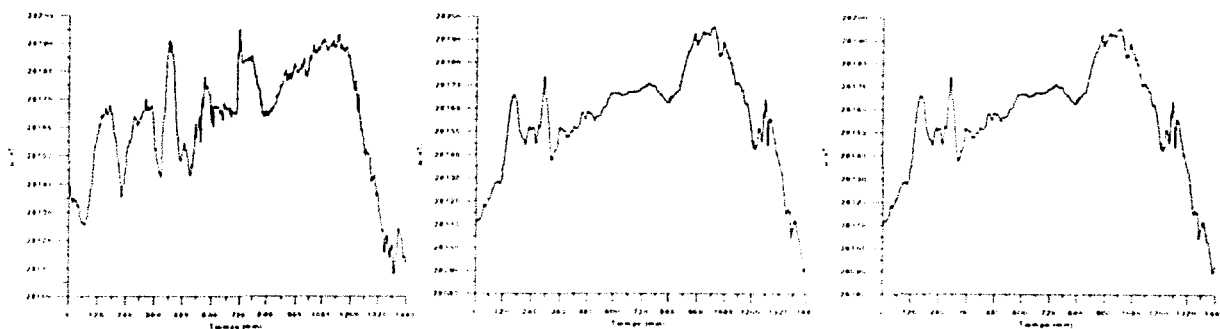
Componente horizontal (H) para los días 8, 22 y 23 de agosto (días quietos).



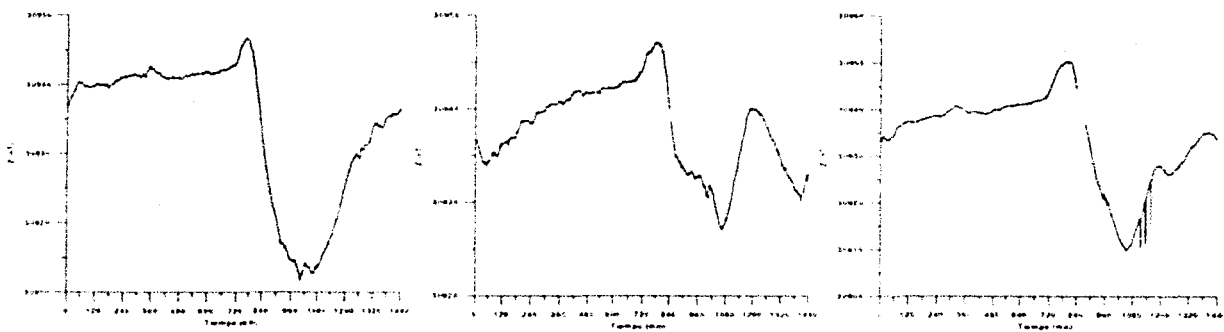
Componente horizontal (H) para los días 24, 25 y 28 de agosto (días quietos).



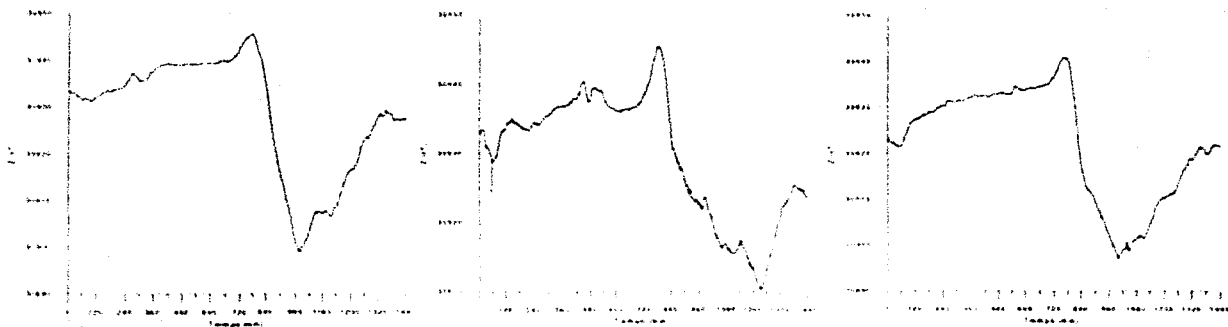
Componente horizontal (H) para los días 31 (día quieto), 1 y 2 de agosto (días perturbados).



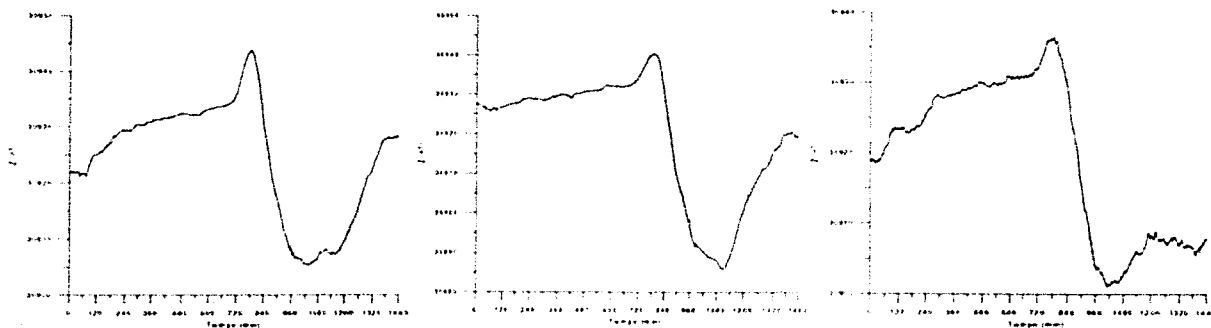
Componente horizontal (H) para los días 19, 20 y 21 de agosto (días perturbados).



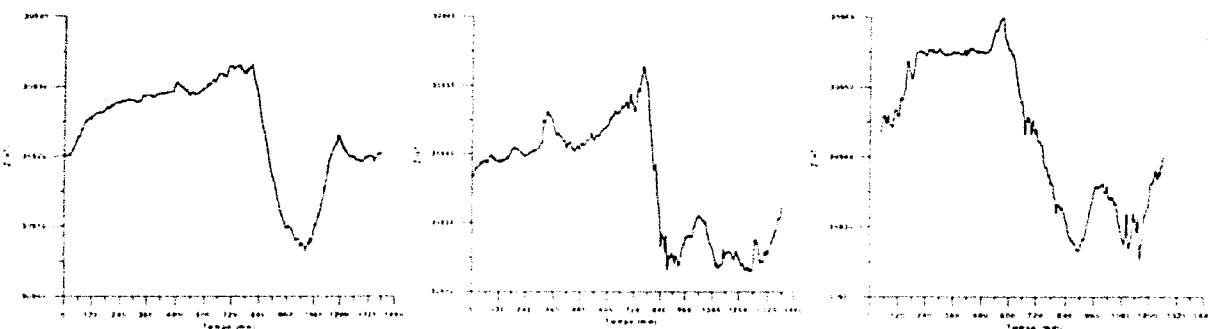
Componente vertical (Z) para los días 5, 6 y 7 de agosto (días quietos).



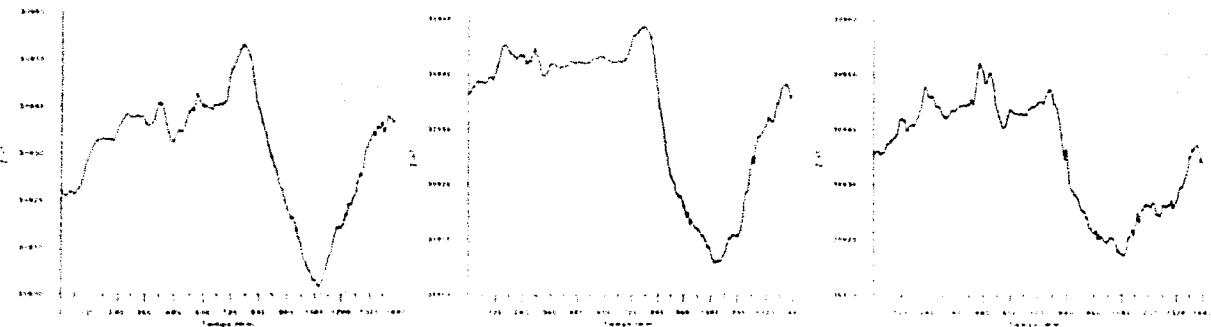
Componente vertical (Z) para los días 8, 22 y 23 de agosto (días quietos).



Componente vertical (Z) para los días 24, 25 y 28 de agosto (días quietos).



Componente vertical (Z) para los días 31 (día quieto), 1 y 2 de agosto (días perturbados).



Componente vertical (Z) para los días 19, 20 y 21 de agosto (días perturbados).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 6. CONCLUSIONES

Para la presentación de conclusiones y resultados de esta tesis debemos considerar que contiene dos partes estructuradas: la primera que es la selección del sitio y la segunda las pruebas de sitio de un observatorio magnético estándar.

### 6.1 Selección del sitio

La metodología usada (capítulo 3) para los 4 sitios de estudio establece un porcentaje de confiabilidad basado en las variables involucradas que se muestran en la tabla 6.1.

Terreno	Porcentaje de utilidad
Teoloyucan 1	95%
Teoloyucan 2	70%
Juriquilla 1	50%
Juriquilla 2	50%
Juriquilla 3	75%
Colima 1	30%
Colima 2	85%
Coeneo	90%

Tabla 6.1 Porcentajes de utilidad de los terrenos.

Estos criterios no son aleatorios, son resultado de la necesidad de cumplir con los estándares internacionales considerados por la IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) entre los miembros dedicados a la operación, instalación y mantenimiento de observatorios magnéticos que han sido publicados en libros fundamentales de Wiennert (1970) y Jankowski y Sucksdorff (1996). En resumen para este fin tenemos que el mejor sitio, bajo condiciones actuales y a mediano plazo, es el lugar del OCI en la colonia Félix Ireta en Coeneo, Michoacán.

Hay que tomar en cuenta que además de esta valoración, que es estrictamente local, se debe realizar una evaluación regional de las características magnéticas, para tal efecto se tomaron los datos a partir de las cartas aeromagnéticas que publica el Consejo de Recursos Minerales, trazándose cuatro perfiles para cada área de estudio. Teoloyucan no fue evaluada de esta forma, ya que se toma como un parámetro de referencia, dado que en este sitio se encuentra operando el Observatorio Magnético de Teoloyucan. Los perfiles realizados que van en dirección N-S y E-W, tienen una extensión de 60 kilómetros, con estaciones cada tres kilómetros y como punto central el sitio donde se llevo a cabo la exploración magnetométrica local, los otros dos perfiles, con direcciones NW-SE y NE-SW, cuentan con una extensión de 30 kilómetros y con el mismo espaciado entre estaciones, nuevamente el punto central es el sitio de estudio local. Observando dichos perfiles vemos que cada uno de los sitios tiene particularidades en la morfología de la curva, que están

relacionadas con la geología regional y la geomorfología. Es importante resaltar que todos los casos de estudio se encuentran ubicados en la misma provincia fisiográfica: la Faja Volcánica Transmexicana, por lo que las afectaciones regionales podrán ser mayores que en otras provincias en las que se tienen rasgos geológicos menos complicados.

El regional de Juriquilla por su parte presenta rasgos suaves, propios de depósitos subhorizontales y potentes, pero con afectaciones por fallas (características de la región), ocasionados por fases tectónicas distensivas propias del vulcanismo reciente. Pero en general, regionalmente el sitio es sumamente apto para el emplazamiento de un observatorio magnético.

En cuanto a Colima, su regional, se ve afectado precisamente por encontrarse ubicado en una zona montañosa y de barrancas, pero además con actividad volcánica actual. Sin embargo vemos como la expresión magnética regional es favorable, por lo que también aquí el carácter regional no es un impedimento para la instalación de un observatorio magnético.

Por último la expresión regional de Coeneo es un poco más complicada que las anteriores, ya que se encuentra ubicado en una zona donde existen depósitos lacustres recientes (situación sumamente favorable para nuestro fin), pero al igual que en los casos anteriores existe afectación por vulcanismo reciente, se presentan varios edificios volcánicos en los alrededores, lo que no complica el asunto sí, como en este caso se realiza un estudio previo de las características magnéticas del medio. También concluimos que en este caso no existe un severo impedimento para la instalación del observatorio magnético en la zona.

Sin embargo resaltaremos que una investigación de las características magnéticas del medio (locales y regionales) es indispensable, pero habrá que considerar otros puntos, principalmente el entorno social y la infraestructura de los sitios, situaciones que en algunos casos pueden llegar a ser más determinantes que los estudios magnéticos, así, una vez analizados dichos tópicos en cada uno de los casos concluimos que el sitio que cumple las condiciones es Coeneo, es por lo siguiente:

1. El crecimiento demográfico en las zonas aledañas al Observatorio de Centelleo Interplanetario es bajo, por lo que podemos asegurar que a corto y mediano plazo no se tendrán afectaciones, o lo que en ocasiones se registra como ruido cultural.
2. En el sitio donde se llevo a cabo la exploración magnetométrica (local), en la porción noroeste del terreno, ya se encuentra instalada una caseta en donde se aloja el equipo, por lo que en términos reales el porcentaje de utilidad de dicho sitio podría ser aún más cercano al 100%, ya que esta es infraestructura propia para el observatorio magnético.
3. Se cuenta con servicios básicos como agua potable, energía eléctrica, teléfono y servicio de Internet. Además de contar con el apoyo de la Policía Municipal para el resguardo de las instalaciones.
4. El acceso a este sitio es sencillo y no presenta mayor contratiempo para llegar a él desde los poblados cercanos.

Hay que remarcar que el control de calidad del registro y recopilación de toda la información requerida para los estudios fue excelente para poner una alta confiabilidad en la toma de la decisión final.

El diseño de un software que se adapto exclusivamente a las necesidades del trabajo, donde se realiza un detallado seguimiento de los procesos, fue un ejercicio muy valioso que ayudó no solo a

comprender las características necesarias para el sitio sino además reforzó la teoría y aplicación de los métodos de exploración magnetométrica. Así de alguna forma se evitó el uso de software que funcionara como "cajas negras" en donde no se comprende ni se tiene el control en los procesos. La comparación de estas rutinas programadas en MATLAB con software público y comercial como el Potencial Fiel Programs del USGS (1995) y el MagMap 2000 de Geometrics (V. 4.24), comprueba que el excelente desempeño es comparable a los anteriores.

## **6.2 Pruebas de sitio**

Las primeras pruebas de sitio en Coeneo (Michoacán) arrojan resultados muy buenos. La operación preliminar fue satisfactoria para los magnetómetros seleccionados de acuerdo a los índices internacionales, donde la respuesta es favorable para los días calmados como los perturbados al comprarlos con el instrumento LAMA del Observatorio Magnético de Teoloyucan.

El pilar de referencia usado, donde se calculo el azimut astronómico de la marca de observación aún es provisional, pues aún no esta definido el desarrollo interno de los espacios dentro del terreno. Sin embargo para las observaciones absolutas se tienen errores criticos muy pequenos y aceptables (sonda, sitio y azimut) que dependen de fechas relevantes que son la determinacion astronómica de la marca de referencia, la calidad de esta marca (distancia, visibilidad, etc.) y por supuesto de la habilidad de los observadores.

Sin embargo, son evidentes las diferencias existentes entre las observaciones absolutas y el modelo matematico IGRF (sección 5.5) debido a que la localizacion de este sitio se encuentra en la porción sur occidental del país, en la frontera donde comienza una carencia de observatorios magnéticos, que provoca que vaya disminuyendo la convergencia del modelo hacia los valores reales del campo por la ausencia de datos espaciales en las regiones mas suroccidentales del hemisferio norte y noroccidental del hemisferio sur (Wolf y de Wardt, 1980).

Por lo anterior se crea la necesidad de instalar nuevos observatorios magnéticos, no solo en nuestro país, sino en el mundo, que cubran esas porciones del planeta donde no hay contribución a los modelos matematicos mas usados (IGRF, MMM, BGGM). Estos nuevos observatorios serian además la parte medular de un Servicio Magnético Nacional para Mexico que pudiera mantener una base de datos que contribuya y valide modelos matematicos regionales y mundiales y que preste un servicio a instituciones públicas y privadas nacional y extranjeros.

Con estos resultados se concluye que la cooperacion internacional entre diversas instituciones puede generar productos de alta calidad a bajo costo, pues basicamente este trabajo es el fruto de 3 instituciones: el Danish Meteorological Institute que es la que diseño y proporcionó el magnetómetro Fluxgate de tres componentes DMI, el Royal Meteorological Institute of Belgium que diseño el magnetómetro Fluxgate de tres componentes LAMA y construyó los DI-flux RM1 y RM2 basados en teodolitos no magnéticos RUSKA, además de la electrónica de adquisición AD77; y finalmente el Departamento de Geomagnetismo del Instituto de Geofísica de la UNAM que realizó el software de adquisición para la electrónica Ad77 y para el magnetómetro de protón G-856 bajo los mejores controles de calidad y automatización establecidos y las

diversas calibraciones de todos los instrumentos bajo diferentes condiciones de operación en diversos sitios y países.

Finalmente se tiene que mencionar que el objetivo general de esta cooperación, de la cual este trabajo forma parte, es la instalación de más observatorios magnéticos de alta calidad principalmente en Latinoamérica y África donde la cobertura de este tipo de instalaciones es muy pobre. Los países que ya cuentan con observatorios con instrumentos similares, software y estándares como los usados en este trabajo son: Argentina, Bolivia, Cuba, Mozambique y próximamente Costa Rica.

### ANEXO 1

A continuación se listan los datos utilizados durante el presente trabajo. En la columna Día se expresa el número de día juliano cuando se realizó el estudio, la columna de Tiempo (UT) expresa el tiempo en horas, minutos y segundos de cada dato (referido al meridiano central), X y Y son las coordenadas en metros (desde el punto de inicio del levantamiento), F es el valor de la intensidad del campo geomagnético leído en el magnetómetro del estudio, Anomalía es el valor del campo después de realizada la corrección por variación diurna y Estación es el número de estación de cada uno de los levantamientos.

Día	Tiempo (UT)	X	Y	F (nT)	Anomalía (nT)	Estación
136	180700	150	50	41819.5	-53.4937	1
136	180800	140	50	41824.3	-47.7169	2
136	180800	130	50	41834.8	-37.2169	3
136	180800	120	50	41845.7	-26.3169	4
136	180900	110	50	41861.2	-10.2401	5
136	180900	100	50	41844.7	-26.7401	6
136	180900	90	50	41840	-31.4401	7
136	181000	80	50	41824.6	-47.2633	8
136	181000	70	50	41851.1	-20.7633	9
136	181000	60	50	41858.3	-13.5633	10
136	181000	50	50			11
136	181100	40	50	41849.6	-22.6866	12
136	181100	30	50	41857.7	-14.5866	13
136	181100	20	50	41842.6	-29.6866	14
136	181200	10	50			15
136	181200	0	50			16
136	181300	0	40	41844.8	-27.133	17
136	181300	10	40	41860.1	-11.833	18
136	181300	20	40	41859.6	-12.333	19
136	181300	30	40	41859.9	-12.033	20
136	181400	40	40	41854.8	-17.9562	21
136	181400	50	40	41854.4	-18.3562	22
136	181400	60	40	41844	-28.7562	23
136	181400	70	40	41845.6	-27.1562	24
136	181500	80	40	41857	-15.7794	25
136	181500	90	40	41848	-24.7794	26
136	181500	100	40			27
136	181600	110	40	41863.6	-9.0027	28
136	181600	120	40	41857.9	-14.7027	29
136	181600	130	40	41846.6	-26.0027	30
136	181700	140	40	41845	-27.6259	31
136	181700	150	40	41821.8	-50.8259	32
136	181900	150	30			33
136	181900	140	30	41828.5	-43.9723	34



136	181900	130	30	41847.3	-25.1723	35
136	182000	120	30	41849.7	-22.5955	36
136	182000	110	30	41846	-26.2955	37
136	182000	100	30	41859.2	-13.0955	38
136	182100	90	30	41863.3	-9.0187	39
136	182100	80	30	41858.7	-13.6187	40
136	182100	70	30	41860.3	-12.0187	41
136	182200	60	30			42
136	182200	50	30	41863.9	-8.042	43
136	182200	40	30	41861.7	-10.242	44
136	182200	30	30	41851.9	-20.042	45
136	182300	20	30	41857.6	-15.1652	46
136	182300	10	30	41861.2	-11.5652	47
136	182300	0	30	41855.3	-17.4652	48
136	182400	0	20	41842.2	-30.1884	49
136	182400	10	20	41851.2	-21.1884	50
136	182400	20	20	41857.7	-14.6884	51
136	182400	30	20	41857	-15.3884	52
136	182500	40	20	41863.9	-9.3116	53
136	182500	50	20	41863.6	-9.6116	54
136	182500	60	20	41852.2	-21.0116	55
136	182500	70	20	41857.1	-16.1116	56
136	182600	80	20	41846.4	-27.0348	57
136	182600	90	20	41854.5	-18.9348	58
136	182600	100	20	41858.9	-14.5348	59
136	182600	110	20	41857.9	-15.5348	60
136	182700	120	20	41853.8	-18.658	61
136	182700	130	20	41847.1	-25.358	62
136	182700	140	20	41829.6	-42.858	63
136	182800	150	20			64
136	183100	150	10			65
136	183100	140	10	41819.5	-52.8509	66
136	183100	130	10	41842.3	-30.0509	67
136	183100	120	10	41857.3	-15.0509	68
136	183200	110	10	41848.9	-22.8741	69
136	183200	100	10	41848.9	-22.8741	70
136	183200	90	10	41859.2	-12.5741	71
136	183300	80	10	41854.4	-17.5973	72
136	183300	70	10	41854.4	-17.5973	73
136	183400	60	10	41859.5	-12.9206	74
136	183400	50	10	41854.6	-17.8206	75
136	183400	40	10	41854.3	-18.1206	76
136	183400	30	10	41863.7	-8.7206	77
136	183500	20	10	41859	-12.8438	78
136	183500	10	10	41819.5	-52.3438	79
136	183600	0	10			80

136	183700	0	0			81
136	183700	10	0			82
136	183700	20	0	41829.1	-43.3902	83
136	183800	30	0	41860.7	-11.4134	84
136	183800	40	0	41856.3	-15.8134	85
136	183900	50	0	41854.7	-17.4367	86
136	183900	60	0	41854.7	-17.4367	87
136	183900	70	0	41849.7	-22.4367	88
136	184000	80	0	41858	-14.1599	89
136	184000	90	0	41864.6	-7.5599	90
136	184000	100	0	41851.8	-20.3599	91
136	184100	110	0	41854.3	-18.2831	92
136	184100	120	0	41855.4	-17.1831	93
136	184100	130	0	41857.5	-15.0831	94
136	184100	140	0	41841	-31.5831	95
136	184100	150	0	41811.2	-61.3831	96

Teoloyucan 1

Día	Tiempo (UT)	X	Y	F (nT)	Anomalía (nT)	Estación
136	184400	40	70	41792.8	-79.091	97
136	184400	30	70	41824.5	-47.391	98
136	184400	20	70	41852.7	-19.191	99
136	184500	10	70	41845.5	-25.9624	100
136	184500	0	70	41811.2	-60.2624	101
136	184500	0	60			102
136	184600	10	60	41844.1	-27.9337	103
136	184600	20	60	41842.8	-29.2337	104
136	184700	30	60	41831.7	-39.905	105
136	184700	40	60	41801.7	-69.905	106
136	184700	40	50	41776.4	-95.205	107
136	184700	30	50	41825.6	-46.005	108
136	184800	20	50	41849.7	-21.8763	109
136	184800	10	50	41852.1	-19.4763	110
136	184800	0	50	41852.3	-19.2763	111
136	184800	0	40	41861.6	-9.9763	112
136	184800	10	40			113
136	184900	20	40	41835.2	-35.5477	114
136	184900	30	40	41813.3	-57.4477	115
136	185000	40	40	41784.4	-86.919	116
136	185000	40	30	41761.3	-110.019	117
136	185000	30	30	41808.8	-62.519	118
136	185000	20	30			119
136	185100	10	30	41846	-26.0903	120
136	185100	0	30	41835	-37.0903	121

136	185100	0	20	41831.1	-40.9903	122
136	185100	10	20	41865.2	-6.8903	123
136	185200	20	20	41829.3	-42.5617	124
136	185200	30	20	41817.1	-54.7617	125
136	185200	40	20	41741.3	-130.5617	126
136	185300	40	10	41755.4	-115.633	127
136	185300	30	10	41856.5	-14.533	128
136	185300	20	10	41841.2	-29.833	129
136	185300	10	10	41839.3	-31.733	130
136	185400	0	10	41832.1	-39.9043	131
136	185400	0	0	41785.9	-86.1043	132
136	185400	10	0	41774	-98.0043	133
136	185400	20	0	41789.3	-82.7043	134
136	185500	30	0	41768.4	-103.3756	135
136	185500	40	0	41732.1	-139.6756	136

Teoloyucan 2

Día	Tiempo (UT)	X	Y	F (nT)	Anomalia (nT)	Estación
194	162807	0	0	42467.0	-249.1	1
194	162807	5	0	42519.0	-197.1	2
194	162807	10	0	42558.8	-157.3	3
194	162807	15	0	42568.8	-147.2	4
194	162807	20	0	42595.2	-120.8	5
194	162807	25	0	42610.8	-105.2	6
194	163007	30	0	42636.6	-79.1	7
194	163007	35	0	42643.6	-72.1	8
194	163007	40	0	42648.2	-67.5	9
194	163007	45	0	42636.0	-79.6	10
194	163007	50	0	42752.6	37.0	11
194	163007	55	0	42651.4	-64.2	12
194	163207	60	0	42660.0	-55.5	13
194	163207	65	0	42660.4	-55.1	14
194	163207	70	0	42698.4	-17.1	15
194	163207	75	0	42639.8	-75.6	16
194	163207	80	0	42627.0	-88.4	17
194	163207	85	0	42630.4	-85.0	18
194	163207	90	0	42659.0	-56.4	19
194	163407	95	0	42626.8	-89.0	20
194	163407	100	0	42630.8	-84.9	21
194	163407	105	0	42615.8	-99.9	22
194	163407	110	0	42633.8	-81.9	23
194	163407	115	0	42613.6	-102.1	24
194	163607	120	0	42645.4	-70.3	25
194	163607	125	0	42658.0	-57.6	26

194	163607	130	0	42648.4	-67.2	27
194	163607	135	0	42644.4	-71.2	28
194	163607	140	0	42645.6	-70.0	29
194	163807	145	0	42656.8	-59.3	30
194	163807	150	0	42642.4	-73.6	31
194	164007	155	0	42638.4	-77.1	32
194	164007	160	0	42644.4	-71.1	33
194	164007	165	0	42682.4	-33.1	34
194	164007	170	0	42666.4	-49.1	35
194	164207	175	0	42643.0	-72.9	36
194	164207	180	0	42619.8	-96.1	37
194	164207	185	0	42618.4	-97.5	38
194	164207	190	0	42617.0	-98.9	39
194	165607	0	10	42580.4	-134.9	40
194	165407	5	10	42556.8	-158.7	41
194	165407	10	10	42497.4	-218.1	42
194	165407	15	10	42570.8	-144.8	43
194	165407	20	10	42566.8	-148.8	44
194	165407	25	10	42489.6	-226.0	45
194	165407	30	10	42565.6	-150.0	46
194	165407	35	10	42601.8	-113.8	47
194	165207	40	10	42610.2	-104.9	48
194	165207	45	10	42618.0	-97.2	49
194	165007	50	10	42633.0	-82.4	50
194	165007	55	10	42630.8	-84.7	51
194	165007	60	10	42629.6	-85.9	52
194	165007	65	10	42598.8	-116.7	53
194	165007	70	10	42638.8	-76.7	54
194	165007	75	10	42678.6	-36.9	55
194	165007	80	10	42629.8	-85.7	56
194	164807	85	10	42610.4	-105.1	57
194	164807	90	10	42617.6	-98.0	58
194	164807	95	10	42628.8	-86.8	59
194	164807	100	10	42637.0	-78.6	60
194	164807	105	10	42639.2	-76.4	61
194	164807	110	10	42620.0	-95.6	62
194	164807	115	10	42632.6	-83.0	63
194	164807	120	10	42708.6	-7.0	64
194	164807	125	10	42659.4	-56.2	65
194	164807	130	10	42631.0	-84.6	66
194	164607	135	10	42637.4	-78.4	67
194	164607	140	10	42645.6	-70.3	68
194	164607	145	10	42645.2	-70.7	69
194	164607	150	10	42653.0	-62.9	70
194	164607	155	10	42673.8	-42.1	71
194	164607	160	10	42634.2	-81.7	72

194	164607	165	10	42670.8	-45.1	73
194	164607	170	10	42644.0	-71.9	74
194	164407	175	10	42623.2	-93.4	75
194	164407	180	10	42666.6	-50.0	76
194	164407	185	10	42637.8	-78.8	77
194	164407	190	10	42633.4	-83.2	78
194	165807	0	20	42542.6	-173.0	79
194	165807	5	20	42521.2	-194.4	80
194	165807	10	20	42565.0	-150.6	81
194	165807	15	20	42580.0	-135.5	82
194	165807	20	20	42596.0	-119.5	83
194	165807	25	20	42607.2	-108.3	84
194	165807	30	20	42594.4	-121.1	85
194	170007	35	20	42606.8	-106.3	86
194	170007	40	20	42591.8	-121.3	87
194	170007	45	20	42603.6	-109.5	88
194	170207	50	20	42585.2	-128.5	89
194	170207	55	20	42595.6	-118.1	90
194	170207	60	20	42610.0	-103.6	91
194	170407	65	20	42627.2	-86.3	92
194	170407	70	20	42608.8	-104.7	93
194	170407	75	20	42586.4	-127.0	94
194	170407	80	20	42615.4	-98.0	95
194	170407	85	20	42655.8	-57.6	96
194	170407	90	20	42649.2	-64.2	97
194	170407	95	20	42653.6	-59.8	98
194	170407	100	20	42652.4	-61.0	99
194	170607	105	20	42666.8	-47.3	100
194	170607	110	20	42661.0	-53.1	101
194	170607	115	20	42668.6	-45.4	102
194	170607	120	20	42661.8	-52.2	103
194	170607	125	20	42632.6	-81.4	104
194	170807	130	20	42635.4	-78.8	105
194	170807	135	20	42655.4	-58.8	106
194	170807	140	20	42640.2	-74.0	107
194	170807	145	20	42634.6	-79.6	108
194	171007	150	20	42634.0	-78.9	109
194	171007	155	20	42634.4	-78.5	110
194	171007	160	20	42645.0	-67.9	111
194	171207	165	20	42671.4	-41.9	112
194	171207	170	20	42594.8	-118.5	113
194	171207	175	20	42605.6	-107.7	114
194	171207	180	20	42561.8	-151.5	115
194	171207	185	20	42592.4	-120.9	116
194	171207	190	20	42584.0	-129.3	117
194	171207	195	20	42566.6	-146.7	118

194	174207	0	30	42607.8	-103.3	119
194	174207	5	30	42614.6	-96.5	120
194	174207	10	30	42595.0	-116.2	121
194	174007	15	30	42602.2	-109.2	122
194	174007	20	30	42638.8	-72.6	123
194	174007	25	30	42731.4	20.0	124
194	174007	30	30	42656.8	-54.6	125
194	173807	35	30	42645.0	-66.8	126
194	173807	40	30	42685.6	-26.2	127
194	173807	45	30	42623.8	-88.1	128
194	173807	50	30	42601.8	-110.1	129
194	173607	55	30	42604.6	-108.1	130
194	173607	60	30	42611.2	-101.5	131
194	173607	65	30	42593.0	-119.7	132
194	173607	70	30	42594.6	-118.1	133
194	173607	75	30	42638.8	-73.9	134
194	173607	80	30	42605.6	-107.1	135
194	173607	85	30	42523.6	-189.2	136
194	173607	90	30	42588.6	-124.2	137
194	173407	95	30	42599.6	-113.4	138
194	173407	100	30	42631.4	-81.7	139
194	173207	105	30	42704.4	-8.6	140
194	173207	110	30	42710.2	-2.8	141
194	173207	115	30	42697.0	-16.0	142
194	173207	120	30	42657.8	-55.2	143
194	173207	125	30	42619.8	-93.3	144
194	173207	130	30	42648.0	-65.1	145
194	173007	135	30	42676.4	-37.1	146
194	173007	140	30	42645.0	-68.5	147
194	173007	145	30	42627.0	-86.5	148
194	173007	150	30	42623.2	-90.4	149
194	173007	155	30	42627.4	-86.2	150
194	173007	160	30	42603.6	-110.0	151
194	172807	165	30	42606.2	-106.8	152
194	172807	170	30	42600.8	-112.2	153
194	172807	175	30	42611.0	-102.1	154
194	172207	180	30	42614.2	-100.4	155
194	172207	185	30	42563.0	-151.7	156
194	172207	190	30	42497.8	-216.9	157
194	172207	195	30	42419.4	-295.3	158
194	172207	200	30	42403.6	-311.1	159
194	174407	0	40	42575.0	-136.2	160
194	174607	5	40	42610.8	-101.0	161
194	174607	10	40	42611.6	-100.2	162
194	174607	15	40	42596.4	-115.4	163
194	174807	20	40	42606.4	-105.8	164

194	174807	25	40	42619.0	-93.2	165
194	174807	30	40	42617.8	-94.4	166
194	174807	35	40	42616.0	-96.2	167
194	174807	40	40	42618.6	-93.6	168
194	174807	45	40	42626.6	-85.6	169
194	175007	50	40	42624.0	-88.7	170
194	175007	55	40	42628.4	-84.3	171
194	175007	60	40	42619.8	-92.9	172
194	175007	65	40	42619.0	-93.7	173
194	175207	70	40	42630.6	-83.4	174
194	175207	75	40	42638.8	-75.2	175
194	175207	80	40	42630.4	-83.6	176
194	175207	85	40	42603.8	-110.1	177
194	175407	90	40	42588.0	-125.0	178
194	175407	95	40	42618.8	-94.2	179
194	175407	100	40	42612.2	-100.8	180
194	175407	105	40	42608.4	-104.6	181
194	175407	110	40	42620.4	-92.6	182
194	175607	115	40	42712.0	-1.2	183
194	175607	120	40	42681.4	-31.8	184
194	175607	125	40	42569.4	-143.8	185
194	175607	130	40	42567.8	-145.4	186
194	175607	135	40	42563.4	-149.8	187
194	175607	140	40	42526.2	-186.9	188
194	175807	145	40	42681.2	-33.1	189
194	175807	150	40	42679.8	-34.4	190
194	175807	155	40	42692.2	-22.0	191
194	175807	160	40	42720.8	6.6	192
194	175807	165	40	42744.8	30.6	193
194	180007	170	40	42759.2	45.5	194
194	180007	175	40	42708.6	-5.1	195
194	180007	180	40	42730.8	17.1	196
194	180207	185	40	42469.0	-245.5	197
194	180207	190	40	42249.6	-464.9	198
194	180207	195	40	42213.8	-500.7	199
194	180207	200	40	42136.8	-577.6	200
194	182207	0	50	42598.8	-118.1	201
194	182207	5	50	42598.0	-118.9	202
194	182207	10	50	42617.6	-99.3	203
194	182207	15	50	42619.8	-97.1	204
194	182207	20	50	42621.8	-95.1	205
194	182207	25	50	42670.0	-46.9	206
194	182007	30	50	42669.4	-47.5	207
194	182007	35	50	42661.0	-55.9	208
194	182007	40	50	42667.2	-49.7	209
194	182007	45	50	42638.6	-78.3	210

194	181807	50	50	42597.4	-119.2	211
194	181807	55	50	42693.8	-22.9	212
194	181807	60	50	42708.4	-8.3	213
194	181807	65	50	42587.4	-129.3	214
194	181807	70	50	42711.2	-5.5	215
194	181807	75	50	42707.2	-9.5	216
194	181807	80	50	42677.6	-39.1	217
194	181607	85	50	42740.2	23.4	218
194	181607	90	50	42869.6	152.8	219
194	181607	95	50	42856.4	139.6	220
194	181607	100	50	42869.0	152.2	221
194	181407	105	50	42644.4	-72.7	222
194	181407	110	50	42713.6	-3.6	223
194	181407	115	50	42740.8	23.6	224
194	181407	120	50	42646.2	-71.0	225
194	181407	125	50	42444.8	-272.4	226
194	181407	130	50	42681.2	-36.0	227
194	181407	135	50	42619.4	-97.8	228
194	181207	140	50	42669.4	-47.6	229
194	181207	145	50	42788.8	71.8	230
194	181207	150	50	42811.0	94.0	231
194	181207	155	50	42861.8	144.8	232
194	181207	160	50	42881.8	164.8	233
194	181007	165	50	42710.2	-6.6	234
194	181007	170	50	42390.4	-326.4	235
194	181007	175	50	42395.8	-321.0	236
194	181007	180	50	42302.8	-414.0	237
194	180807	185	50	42520.4	-195.8	238
194	180807	190	50	42592.6	-123.6	239
194	180807	195	50	42581.4	-134.8	240
194	180807	200	50	42608.6	-107.6	241

Junquilla 1

Día	Tiempo (UT)	X	Y	F (nT)	Anomalia (nT)	Estación
195	195258	0	0	42662.4	-4.9	1
195	195258	5	0	42662.2	-5.1	2
195	195458	10	0	42667.6	0.3	3
195	195458	15	0	42665.2	-2.0	4
195	195658	20	0	42662.6	-5.2	5
195	195858	25	0	42646.6	-20.6	6
195	195858	30	0	42660.6	-6.6	7
195	195858	35	0	42663.8	-3.4	8
195	195858	40	0	42674	6.9	9
195	200058	45	0	42688.4	24.7	10



195	200058	50	0	42672	8.4	11
195	200058	55	0	42677.8	14.2	12
195	200058	60	0	42686	22.4	13
195	200058	65	0	42678.8	15.2	14
195	200258	70	0	42677	13.2	15
195	200258	75	0	42518.8	-145.0	16
195	200258	80	0	42528.6	-135.1	17
195	200458	85	0	42504.2	-159.3	18
195	200458	90	0	42419.2	-244.3	19
195	200458	95	0	42262	-401.4	20
195	200458	100	0	42209.4	-454.0	21
195	200458	105	0	42254.6	-408.8	22
195	200658	110	0	42029.6	-632.7	23
195	200658	115	0	42030.6	-631.7	24
195	200658	120	0	42005.2	-657.1	25
195	200658	125	0	41997.2	-665.1	26
195	200658	130	0	42178.6	-483.6	27
195	200658	135	0	42129.6	-532.6	28
195	202458	0	10	42614.6	-50.3	29
195	202458	5	10	42626.8	-38.1	30
195	202458	10	10	42643.8	-21.2	31
195	202458	15	10	42656.4	-8.6	32
195	202458	20	10	42652.4	-12.6	33
195	202258	25	10	42650.4	-14.9	34
195	202258	30	10	42639.2	-26.1	35
195	202258	35	10	42609.6	-55.8	36
195	202058	40	10	42671.2	6.6	37
195	202058	45	10	42651.8	-12.8	38
195	202058	50	10	42625.8	-38.9	39
195	202058	55	10	42670.6	5.9	40
195	201858	60	10	42676.2	12.6	41
195	201858	65	10	42676.2	12.6	42
195	201858	70	10	42693.2	29.6	43
195	201658	75	10	42676.8	13.5	44
195	201658	80	10	42711.6	48.3	45
195	201658	85	10	42701.6	38.3	46
195	201658	90	10	42696.8	33.4	47
195	201658	95	10	42670.2	6.8	48
195	201458	100	10	42592.2	-70.6	49
195	201458	105	10	42642	-20.9	50
195	201458	110	10	42695.8	32.9	51
195	201258	115	10	42689.2	26.8	52
195	201258	120	10	42718.8	56.4	53
195	201258	125	10	42710.8	48.4	54
195	201258	130	10	42702.6	40.1	55
195	201258	135	10	42723.4	60.9	56

195	201058	140	10	42693.8	31.6	57
195	202658	0	20	42525	-140.0	58
195	202858	5	20	42523.8	-141.6	59
195	202858	10	20	42560	-105.4	60
195	202858	15	20	42623.4	-42.0	61
195	203058	20	20	42640.4	-26.5	62
195	203058	25	20	42637	-29.9	63
195	203058	30	20	42627.4	-39.4	64
195	203058	35	20	42746.8	80.0	65
195	203058	40	20	42684.2	17.4	66
195	203058	45	20	42653	-13.8	67
195	203258	50	20	42680.4	13.7	68
195	203258	55	20	42636.8	-29.8	69
195	203258	60	20	42653.8	-12.8	70
195	203458	65	20	42534.4	-132.6	71
195	203458	70	20	42634	-32.9	72
195	203458	75	20	42669.4	2.5	73
195	203458	80	20	42684	17.1	74
195	203658	85	20	42697.8	29.8	75
195	203658	90	20	42694.2	26.2	76
195	203658	95	20	42697.8	29.8	77
195	203658	100	20	42703.4	35.4	78
195	203658	105	20	42702.4	34.5	79
195	203658	110	20	42709.2	41.3	80
195	203858	115	20	42719.2	51.0	81
195	203858	120	20	42729.6	61.4	82
195	203858	125	20	42717.4	49.3	83
195	203858	130	20	42672.2	4.1	84
195	203858	135	20	42669.6	1.5	85
195	205858	0	30	42613.6	-59.4	86
195	205858	5	30	42595	-78.1	87
195	205858	10	30	42509.4	-163.7	88
195	205658	15	30	42426.2	-246.5	89
195	205658	20	30	42440.4	-232.4	90
195	205458	25	30	42451	-221.0	91
195	205458	30	30	42391.8	-280.2	92
195	205458	35	30	42467.2	-204.9	93
195	205258	40	30	42180.6	-491.4	94
195	205258	45	30	42097.2	-574.9	95
195	205058	50	30	42259.4	-412.2	96
195	205058	55	30	42484.8	-186.9	97
195	205058	60	30	42587.8	-83.9	98
195	204858	65	30	42588.8	-82.5	99
195	204858	70	30	42635.6	-35.7	100
195	204858	75	30	42656.6	-14.7	101
195	204858	80	30	42671.8	0.5	102

195	204658	85	30	42589.8	-81.4	103
195	204658	90	30	42661	-10.2	104
195	204658	95	30	42692.4	21.1	105
195	204658	100	30	42682	10.7	106
195	204458	105	30	42697.4	26.5	107
195	204458	110	30	42710	39.1	108
195	204458	115	30	42713.6	42.7	109
195	204458	120	30	42709.6	38.6	110
195	204258	125	30	42705.6	35.4	111
195	204258	130	30	42691	20.8	112
195	204258	135	30	42702.2	31.9	113
195	204258	140	30	42707.2	36.9	114
195	210258	0	40	42896.6	226.2	115
195	210258	5	40	42738.2	67.8	116
195	210258	10	40	42608.8	-61.5	117
195	210458	15	40	42659.8	-9.8	118
195	210458	20	40	42091.6	-578.0	119
195	210458	25	40	42328.8	-340.7	120
195	210458	30	40	42763.2	93.7	121
195	210658	35	40	42855.8	186.0	122
195	210658	40	40	42237	-432.8	123
195	210858	45	40	42170.6	-498.9	124
195	210858	50	40	42172.4	-497.1	125
195	210858	55	40	41978.4	-691.0	126
195	211058	60	40	42080.4	-589.0	127
195	211058	65	40	42218.4	-451.0	128
195	211058	70	40	42180.4	-489.0	129
195	211058	75	40	42561.8	-107.5	130
195	211258	80	40	42600.8	-69.0	131
195	211258	85	40	42613.6	-56.2	132
195	211458	90	40	42653.2	-16.5	133
195	211458	95	40	42659.6	-10.1	134
195	211458	100	40	42667	-2.7	135
195	211658	105	40	42684.4	15.4	136
195	211658	110	40	42708.4	39.5	137
195	211658	115	40	42697.2	28.3	138
195	211858	120	40	42725.8	56.3	139
195	211858	125	40	42663	-6.5	140
195	212058	130	40	42746.6	76.9	141
195	212058	135	40	42695.2	25.5	142
195	212058	140	40	42651.4	-18.2	143
195	215658	0	50	43057.8	390.7	144
195	215658	5	50	43132.6	465.4	145
195	215658	10	50	43202	534.8	146
195	215458	15	50	42941.2	274.4	147
195	215458	20	50	42703.2	36.3	148

195	215458	25	50	42768.6	101.7	149
195	215258	30	50	42781.4	113.6	150
195	215258	35	50	42681.8	14.0	151
195	215258	40	50	42758.2	90.3	152
195	215258	45	50	42814.6	146.7	153
195	215058	50	50	42705.4	37.8	154
195	215058	55	50	42828.6	161.0	155
195	215058	60	50	42872	204.3	156
195	215058	65	50	42908.8	241.1	157
195	215058	70	50	43158.8	491.1	158
195	214858	75	50	43139.8	472.1	159
195	214858	80	50	42990.8	323.1	160
195	214858	85	50	42669	1.2	161
195	214858	90	50	42385.6	-282.2	162
195	214658	95	50	42536	-131.8	163
195	214658	100	50	42527.2	-140.6	164
195	214458	105	50	42631	-37.8	165
195	214458	110	50	42549.8	-119.0	166
195	214458	115	50	42393	-275.9	167
195	214258	120	50	42494.6	-174.1	168
195	214258	125	50	42512.8	-156.0	169
195	214058	130	50	42636.2	-33.0	170
195	214058	135	50	42565.2	-104.0	171
195	213858	140	50	42594.4	-75.3	172
195	220058	0	60	42940.4	276.0	173
195	220058	5	60	43104.6	440.3	174
195	220058	10	60	42975.8	311.5	175
195	220058	15	60	42951.8	287.5	176
195	220258	20	60	42720.2	56.2	177
195	220258	25	60	42750.8	86.8	178
195	220258	30	60	42708.4	44.5	179
195	220258	35	60	42783.4	119.5	180
195	220458	40	60	42867.6	203.0	181
195	220458	45	60	43000.8	336.2	182
195	220458	50	60	42582.8	-81.7	183
195	220458	55	60	42610.6	-53.9	184
195	220658	60	60	42616.6	-48.2	185
195	220658	65	60	42448.4	-216.4	186
195	220658	70	60	42257.2	-407.6	187
195	220658	75	60	42425.6	-239.1	188
195	220858	80	60	42668.8	3.6	189
195	221058	85	60	42760.6	95.4	190
195	221058	90	60	42888.8	223.6	191
195	221258	95	60	42399.6	-265.6	192
195	221258	100	60	42310.6	-354.5	193
195	221658	105	60	42300.6	-364.9	194

195	221658	110	60	42474.8	-190.7	195
195	221658	115	60	42744.6	79.2	196
195	221858	120	60	42564.2	-101.1	197
195	222058	125	60	42599.2	-65.0	198
195	222058	130	60	42252.8	-411.3	199
195	222258	135	60	42359.2	-304.4	200
195	222258	140	60	42375.2	-288.4	201

Juriquilla 2

Día	Tiempo (UT)	X	Y	F (nT)	Anomalia (nT)	Estación
192	201800	20	0	42428.2	458.0764	1
192	201800	30	0	42497.3	527.1464	2
192	201700	40	0	42589.8	619.7668	3
192	201600	50	0	42519	548.8273	4
192	201500	60	0	42427.6	457.3077	5
192	201500	70	0	42385.9	415.6677	6
192	201400	80	0	42515.4	545.1682	7
192	201400	90	0	42395.3	424.9982	8
192	201400	100	0	42428.5	458.2282	9
192	200900	10	10	42544.1	573.6704	10
192	200900	20	10	42531.4	560.9704	11
192	200900	30	10	42500.1	529.6604	12
192	201000	40	10	42458.9	488.88	13
192	201000	50	10	42513.3	543.33	14
192	201000	60	10	42581.6	611.65	15
192	201000	70	10	42371.3	401.29	16
192	201100	80	10	42437.1	466.5695	17
192	201100	90	10	42467.7	497.1795	18
192	201200	100	10	42484.9	514.7191	19
192	200800	10	20	42531.4	561.1409	20
192	200800	20	20	42356.6	386.3009	21
192	200800	30	20	42464.2	493.9909	22
192	200700	40	20	42502.8	532.5613	23
192	200700	50	20	42558.5	588.2113	24
192	200700	60	20	42449.8	479.4813	25
192	200600	70	20	42549.3	579.4118	26
192	200600	80	20	42355.9	386.0118	27
192	195900	10	30	42517.5	544.9629	28
192	200000	20	30	42528.9	558.0045	29
192	200000	30	30	42441.2	470.3045	30
192	200000	40	30	42556.2	585.3445	31
192	200000	50	30	42537.5	566.5845	32
192	200100	60	30	42504.2	533.314	33

192	200100	70	30	42543.2	572.334	34
192	200200	80	30	42522.5	551.6436	35
192	195900	10	40	42529.8	557.3329	36
192	195800	20	40	42461.2	488.8434	37
192	195800	30	40	42518.6	546.2934	38
192	195700	40	40	42511.2	538.6538	39
192	195700	50	40	42532.2	559.6238	40
192	195700	60	40	42482	509.4038	41
192	195700	70	40	42533.2	560.6438	42
192	195600	80	40	42463.1	491.1543	43
192	195000	0	50	42670.3	698.357	44
192	195000	10	50	42503.7	531.717	45
192	195000	20	50	42528.7	556.697	46
192	195100	30	50	42585.4	613.0865	47
192	195100	40	50	42501.3	528.9965	48
192	195200	50	50	42430.7	458.6161	49
192	195200	60	50	42443.1	471.0361	50
192	195200	70	50	42568.1	596.0361	51
192	195300	80	50	42538.1	566.2256	52
192	195400	90	50	42474.8	502.5852	53
192	195400	100	50	42441.6	469.3852	54
192	194900	0	60	42424.2	452.0274	55
192	194800	10	60	42544	572.3879	56
192	194800	20	60	42541.7	570.0679	57
192	194700	30	60	42603	631.1583	58
192	194700	40	60	42446.1	474.2083	59
192	194600	50	60	42566.4	594.5588	60
192	194600	60	60	42548.8	576.8788	61
192	194600	70	60	42537.3	565.3988	62
192	194500	80	60	42558.2	587.1292	63
192	194500	90	60	42546.5	575.3892	64
192	194500	100	60	42515.5	544.3692	65
192	193800	0	70	42500.3	530.1824	66
192	193900	10	70	42548.2	577.5519	67
192	193900	20	70	42575.2	604.5419	68
192	194000	30	70	42579.8	608.7315	69
192	194100	40	70	42579.6	608.151	70
192	194100	50	70	42538.3	566.881	71
192	194100	60	70	42594.5	623.031	72
192	194200	70	70	42594.4	622.6106	73
192	194200	80	70	42566.8	594.9806	74
192	194300	90	70	42593.1	620.9601	75
192	194300	100	70	42543.9	571.7401	76

192	193500	0	80	42449.1	479.0437	77
192	193500	10	80	42424.8	454.7937	78
192	193400	20	80	42446.7	476.8142	79
192	193300	30	80	42547.1	577.2146	80
192	193300	40	80	42587.6	617.7746	81
192	193300	50	80	42579.4	609.5046	82
192	193200	60	80	42594.4	624.6651	83
192	193200	70	80	42586	616.3351	84
192	193200	80	80	42634.5	664.7951	85
192	193100	90	80	42551	581.4355	86
192	193100	100	80	42560.3	590.7555	87
192	192200	0	90	42528.3	558.4596	88
192	192300	10	90	42523.7	554.3091	89
192	192400	20	90	42581.3	611.5687	90
192	192500	30	90	42624.7	654.8282	91
192	192600	40	90	42612.6	643.1478	92
192	192600	50	90	42642.2	672.7278	93
192	192700	60	90	42592.1	622.2473	94
192	192700	70	90	42673.2	703.3473	95
192	192800	80	90	42663	693.1769	96
192	192800	90	90	42561.5	591.6969	97
192	192900	100	90	42589.5	619.9464	98
192	191600	0	100	42562.4	592.0123	99
192	191500	10	100	42543.3	572.5427	100
192	191400	20	100	42489	518.5732	101
192	191400	30	100	42658.5	688.0832	102
192	191300	40	100	42539.3	569.0896	103
192	191300	50	100	42613.2	642.8936	104
192	191200	60	100	42661.9	691.6041	105
192	191200	70	100	42657.3	687.0541	106
192	191100	80	100	42601.1	630.4145	107
192	191000	90	100	42584.5	613.745	108
192	190900	100	100	42634.8	663.8654	109

Junquilla 3

Día	Tiempo (UT)	X	Y	F (nT)	Anomalia (nT)	Estación
306	230400	0	0	41205.6	-140.8473	1
306	230500	5	0	41350.2	-13.6442	2
306	230500	10	0	41319.4	-44.4442	3
306	230500	15	0	41292.8	-71.0442	4
306	230500	20	0	41250.4	-113.4442	5
306	230600	25	0	41292.2	-121.0412	6

306	230600	30	0	41348	-65.2412	7
306	230600	35	0	41401.8	-11.4412	8
306	230700	40	0	41411.4	67.9618	9
306	230700	45	0	41467.4	123.9618	10
306	230700	50	0	41460.6	117.1618	11
306	230700	55	0	41479.8	136.3618	12
306		60	0			13
306		65	0			14
306	231400	0	5	41314.8	-76.2169	15
306	231400	5	5	41288	-103.0169	16
306	231300	10	5	41290.4	-54.0199	17
306	231300	15	5	41277.6	-66.8199	18
306	231300	20	5	41273.6	-70.8199	19
306	231300	25	5	41294.2	-50.2199	20
306	231200	30	5	41288.8	-55.023	21
306	231200	35	5	41353.2	9.377	22
306	231200	40	5	41341.6	-2.223	23
306	231200	45	5	41413.2	69.377	24
306	231100	50	5	41400.6	54.374	25
306	231100	55	5	41443.6	97.374	26
306	231100	60	5	41507.8	161.574	27
306	231100	65	5	41611.6	265.374	28
306	231100	70	5	41680	333.774	29
306	231000	75	5	41513.4	168.1709	30
306	231500	0	10	41280.8	-65.2139	31
306	231500	5	10	41276.8	-69.2139	32
306	231500	10	10	41276.2	-69.8139	33
306	231600	15	10	41296	-49.2108	34
306	231600	20	10	41265.2	-80.0108	35
306	231600	25	10	41341.8	-3.4108	36
306	231600	30	10	41285.6	-59.6108	37
306	231700	35	10	41351.6	6.7922	38
306	231700	40	10	41354.2	9.3922	39
306	231700	45	10	41376.2	31.3922	40
306	231700	50	10	41305.4	-39.4078	41
306	231800	55	10	41270.6	-74.0048	42
306	231800	60	10	41503.4	158.7952	43
306	231800	65	10	41560	215.3952	44
306	231800	70	10	41594	249.3952	45
306	231900	75	10	41519.2	173.1983	46
306	232500	0	15	41277	-65.5835	47
306	232400	5	15	41266.6	-76.9866	48
306	232400	10	15	41282.8	-60.7866	49



306	232400	15	15	41316.4	-27.1866	50
306	232300	20	15	41229	-197.9896	51
306	232300	25	15	41305.6	-121.3896	52
306	232200	30	15	41359.8	19.8074	53
306	232200	35	15	41316	-23.9926	54
306	232100	40	15	41732.4	389.6043	55
306	232100	45	15	41956.4	613.6043	56
306		50	15			57
306		55	15			58
306	232000	60	15	41856	511.0013	59
306	232000	65	15	41477.4	132.4013	60
306	231900	70	15	41477.8	131.7983	61
306	231600	0	20	41270.6	-74.6108	62
306	231600	10	20	41197.4	-147.8108	63
306	231700	15	20	41303.6	-41.2078	64
306	231700	20	20	41277.6	-67.2078	65
306	231700	25	20	41294.4	-50.4078	66
306	231700	30	20	41314	-30.8078	67
306	232800	35	20	41235.4	-109.3744	68
306	232800	40	20	41220.6	-124.1744	69
306		45	20			70
306		50	20			71
306		55	20			72
306		60	20			73
306		65	20			74
306		70	20			75
306		75	20			76
306		80	20			77
306	233100	85	20	41408.2	65.6347	78
306	233100	90	20	41455.4	112.8347	79
306	233700	0	25	41224.8	-116.7471	80
306	233600	5	25	41286.4	-55.9502	81
306	233600	10	25	41331.4	-10.9502	82
306	233600	15	25	41339.6	-2.7502	83
306	233600	20	25	41343.6	1.2498	84
306	233500	25	25	41311.4	-56.5532	85
306	233500	30	25	41280.6	-87.3532	86
306	233400	35	25	41282.6	-105.1562	87
306	233400	40	25	41132.8	-254.9562	88
306		45	25			89
306		50	25			90
306		55	25			91
306		60	25			92

306		65	25			93
306		70	25			94
306		75	25			95
306	233200	80	25	41242.4	-97.9623	96
306	233200	85	25	41404.6	64.2377	97
306	233700	0	30	41281.8	-59.7471	98
306	233700	5	30	41331	-10.5471	99
306	233800	10	30	41300.6	-115.5441	100
306	233800	15	30	41333.4	-82.7441	101
306	233800	20	30	41335.2	-80.9441	102
306	233900	25	30	41278.6	-64.5411	103
306	233900	30	30	41179	-164.1411	104
306	233900	35	30	41159	-184.1411	105
306		40	30			106
306		45	30			107
306		50	30			108
306		55	30			109
306		60	30			110
306		65	30			111
306		70	30			112
306	234300	75	30	41358.6	20.0711	113
306	234400	80	30	41389.6	49.2741	114
306	235000	0	35	41222.6	-117.7077	115
306	234900	5	35	41350.2	8.4893	116
306	234900	10	35	41366.4	24.6893	117
306	234900	15	35	41311	-30.7107	118
306	234800	20	35	41292	-51.9138	119
306	234800	25	35	41285.6	-58.3138	120
306	234800	30	35	41311.6	-32.3138	121
306	234800	35	35	41194.8	-149.1138	122
306	234800	40	35	41140.2	-203.7138	123
306	234700	45	35	41345.6	-4.9168	124
306	234700	50	35	41374.4	23.8832	125
306		55	35			126
306		60	35			127
306		65	35			128
306		70	35			129
306		75	35			130
306		80	35			131
306	234500	85	35	41094.6	-244.7229	132
306	234500	90	35	41320.2	-19.1229	133
306	235000	0	40	41277.6	-62.7077	134
306	235000	5	40	41405.8	65.4923	135

306	235000	10	40	41425	84.6923	136
306	235100	15	40	41340.2	-2.3047	137
306	235100	20	40	41258.2	-84.3047	138
306	235200	25	40	41212.2	-126.7016	139
306	235200	30	40	41255.4	-83.5016	140
306		35	40			141
306		40	40			142
306		45	40			143
306	235300	50	40	41103.2	-241.8986	144
306	235300	55	40	41167.8	-177.2986	145
306		60	40			146
306		65	40			147
306		70	40			148
306		75	40			149
306		80	40			150
306	235500	85	40	41347.6	5.5075	151
306	235500	90	40	41233.6	-108.4925	152
307	200	0	45	41397.2	46.7688	153
307		5	45			154
307	0	10	45	41355.4	6.1628	155
307	0	15	45	41170.6	-178.6372	156
307		20	45			157
307		25	45			158
307		30	45			159
307		35	45			160
307		40	45			161
307		45	45			162
307		50	45			163
306	235800	55	45	41066.6	-276.4834	164
306	235800	60	45	40973.4	-369.6834	165
306	235700	65	45	41032.6	-309.6865	166
306	235700	70	45	41451.2	108.9135	167
306	235700	75	45	41571.4	229.1135	168
306	235700	80	45	41580.6	238.3135	169
306	235600	85	45	41387.6	46.7105	170
306	235600	90	45	41393.6	52.7105	171
307	300	0	50	41349.6	-0.82814	172
307	300	5	50	41354.8	4.3719	173
307	300	10	50	41328.4	-22.0281	174
307	400	15	50	41259.8	-86.4251	175
307	400	20	50	41074	-272.2251	176
307		25	50			177
307		30	50			178

307		35	50			179
307		40	50			180
307		45	50			181
307		50	50			182
307		55	50			183
307		60	50			184
307	700	65	50	41114.8	-232.816	185
307	800	70	50	41227.6	-122.813	186
307	800	75	50	41295.8	-54.613	187
307	800	80	50	41350.4	-0.012969	188

Colima 1

Día	Tiempo (UT)	X	Y	F (nT)	Anomalía (nT)	Estación
307	202900	0	0	41215.8	-118.4863	1
307	203000	5	0	41237	-95.8744	2
307	203000	10	0	41317	-15.8744	3
307	203000	15	0	41313.2	-19.6744	4
307	203000	20	0	41357.4	24.5256	5
307	203100	25	0	41683	346.9375	6
307	203200	0	5	41433.4	48.5495	7
307	203200	5	5	41409.4	24.5495	8
307	203200	10	5	41371.2	-13.6505	9
307	203200	15	5	41340.6	-44.2505	10
307	203100	20	5	41374.4	38.3375	11
307	203100	25	5	41507.8	171.7375	12
307	203300	0	10	41304.6	-82.4386	13
307	203400	5	10	41320	-15.8267	14
307	203400	10	10	41355	19.1733	15
307	203500	15	10	41339.8	3.9853	16
307	203500	20	10	41364.8	28.9853	17
307	203500	25	10	41413	77.1853	18
307	203600	0	15	41348.6	15.3972	19
307	203600	5	15	41340.4	7.1972	20
307	203600	10	15	41333.2	-0.002807	21
307	203600	15	15	41320.2	-13.0028	22
307	203700	20	15	41285.6	-80.5909	23
307	203700	25	15	41274.4	-91.7909	24
307	203800	0	20	41223.8	-107.7789	25
307	203800	5	20	41261.6	-69.9789	26
307	203800	10	20	41299	-32.5789	27
307	203900	15	20	41315.8	-60.167	28
307	203900	20	20	41341.8	-34.167	29
307	203900	25	20	41344.8	-31.167	30
307	204100	0	25	41277.4	-75.5432	31

307	204100	5	25	41279.6	-73.3432	32
307	204000	10	25	41301.4	-70.1551	33
307	204000	15	25	41327.4	-44.1551	34
307	204000	20	25	41341.8	-29.7551	35
307	204000	25	25	41368.6	-2.9551	36
307	204200	0	30	41257.6	-74.3312	37
307	204200	5	30	41287.8	-44.1312	38
307	204200	10	30	41307.6	-24.3312	39
307	204200	15	30	41316.4	-15.5312	40
307	204300	20	30	41325.2	-6.5193	41
307	204300	25	30	41352.8	21.0807	42
307	204500	0	35	41299.2	-80.0954	43
307	204500	5	35	41301.6	-77.6954	44
307	204400	10	35	41315.4	-27.1074	45
307	204400	15	35	41328.6	-13.9074	46
307	204400	20	35	41337.6	-4.9074	47
307	204400	25	35	41347	4.4926	48
307	204500	0	40	41293.4	-85.8954	49
307	204600	5	40	41331.8	2.1165	50
307	204600	10	40	41320.8	-8.8835	51
307	204600	15	40	41332.4	2.7165	52
307	204600	20	40	41322	-7.6835	53
307	204600	25	40	41354.8	25.1165	54

Colima 2

Día	Tiempo (UT)	X	Y	F (nT)	Anomalía (nT)	Estación
152	132100	0	0	41874.1	21.842	1
152	133300	8	0	41879.6	27.2254	2
152	133300	16	0	41884.4	32.0254	3
152	134300	24	0	41916.9	64.652	4
152	132200	0	10	41868.4	16.4989	5
152	133200	8	10	41872.5	19.7685	6
152	133400	16	10	41878.8	26.7824	7
152	134300	24	10	41835.8	-16.448	8
152	132200	0	20	41884.4	32.4989	9
152	133100	8	20	41916.9	64.4115	10
152	133400	16	20	41884.4	32.3824	11
152	134300	24	20	41839.7	-12.105	12
152	132300	0	30	41857.3	5.3559	13
152	133100	8	30	41858.5	6.0115	14
152	133500	16	30	41857.8	5.7394	15
152	134300	24	30	41870	18.195	16
152	132300	0	40	41852.1	0.15588	17
152	133100	8	40	41856.3	3.8115	18

152	133500	16	40	41857.7	5.6394	19
152	134200	24	40	41884.2	32.2381	20
152	132400	0	50	41850.8	-1.3872	21
152	133000	8	50	41852.7	-0.54542	22
152	133600	16	50	41858.8	6.6963	23
152	134200	24	50	41847.5	-4.4619	24
152	132400	0	60	41845.6	-6.5872	25
152	133000	8	60	41849.2	-4.0454	26
152	133600	16	60	41852.7	0.59632	27
152	134100	24	60	41979	126.6811	28
152	132400	0	70	41834.6	-17.5872	29
152	133000	8	70	41832.4	-20.8454	30
152	133600	16	70	41845.1	-7.0037	31
152	134100	24	70	41812	-40.3189	32
152	132500	0	80	41757.8	-94.6302	33
152	132900	8	80	41809	-43.4024	34
152	133700	16	80	41840.2	-12.3467	35
152	134000	24	80	41867.7	15.2241	36
152	132600	0	90	41582.4	-269.2732	37
152	132900	8	90	41830.3	-22.1024	38
152	133700	16	90	41839.5	-13.0467	39
152	134000	24	90	41870	17.5241	40
152	132600	0	100	41855.9	4.2268	41
152	132800	8	100	41840.7	-12.0593	42
152	133800	16	100	41854.4	2.0102	43
152	133900	24	100	41839.6	-12.8328	44
152	132700	0	110	41974.3	121.9837	45
152	132800	8	110	41678.9	-173.8593	46
152		16	110			47
152	132800	24	110	41872.1	19.3407	48

Coeneo

## ANEXO 2

A continuación se presenta el listado de los programas diseñados en Matlab, y la explicación de su funcionamiento.

### **Corrección por variación diurna**

```
% Selección del archivo que contiene los datos para el proceso
clear;
[datafile,datapath]=uigetfile('*.dat','MagneKit 1.0 ---> Corrección Diurna');
while datafile==0 & datapath==0
    err=errorDlg('Necesitas seleccionar un archivo','MagneKit 1.0');
    waitfor(err,'Close');
    [datafile,datapath]=uigetfile('*.dat',...
    'Selecciona el archivo para el procesado');
end
archin=strcat(datapath,datafile);
DATA=dlmread(archin,'\t');
orden=size(DATA);
% Conteo de datos
cont0=1;
while DATA(cont0,1) ~= 999
    ndmm=cont0;
    if cont0==orden(1,1)
        cont0=cont0+1;
    else
        break
    end
end
cont1=1;
while DATA(cont1,3) ~= 999
    ndmb=cont1;
    if cont1==orden(1,1)
        cont1=cont1+1;
    else
        break
    end
end
% Cálculo de la estimación lineal
tmm=DATA(1:ndmm,1);
Fmm=DATA(1:ndmm,2);
tmb=DATA(1:ndmb,3);
Fmb=DATA(1:ndmb,4);
rlmc=polyfit(tmb,Fmb,1);
Fmmb=rlmc(1)*tmb+rlmc(2);
% Cálculo de la corrección
barra = waitbar(0,'Haciendo los cálculos...');
for cont2=1:ndmm
    for cont3=1:ndmb
        valor=(cont3)-tmm(cont2)-tmb(cont3);
    end
    minval=min(abs(valor));
    if minval<30
        cont4=1;
        while cont4<=ndmb
            resta0=minval-abs(valor(cont4));
            if resta0==0
                posi=cont4;
            end
            cont4=cont4+1;
        end
    end
end
```

```
end
if minval>=30 & minval<=40
    posi1=1;
    cont5=1;
    while cont5<=ndmb
        resta1=minval-abs(valor(cont5));
        if resta1==0
            posi1=posi1+cont5;
        end
        cont5=cont5+1;
    end
    if tmb(posi1) == 0
        comp1=tmb(cont2)-235960;
    else
        comp1=tmb(cont2)-tmb(posi1);
    end
    cont6=1;
    while cont6<=ndmb
        resta2=minval-abs(valor(cont6));
        if resta2==0
            posi2=cont6;
        end
        cont6=cont6+1;
    end
    if abs(comp1)<100
        posi=posi1;
    else
        posi=posi2;
    end
end
if minval > 40 & minval < 50
    posi3=1;
    cont7=1;
    while cont7<=ndmb
        resta3=minval-abs(valor(cont7));
        if resta3 == 0
            posi3=posi3+cont7;
        end
        cont7=cont7+1;
    end
    if tmb(posi3) == 0
        comp3=tmb(cont2)-235960;
    else
        comp3=tmb(cont2)-tmb(posi3);
    end
    cont8=1;
    while cont8<=ndmb
        resta4=minval-abs(valor(cont8));
        if resta4 == 0
            posi4=cont8;
        end
        cont8=cont8+1;
    end
    posi5=-1;
    cont9=1;
    while cont9<=ndmb
        resta5=minval-abs(valor(cont9));
        if resta5 == 0
            posi5=posi5+cont9;
        end
        cont9=cont9+1;
    end
    comp5=tmb(cont2)-tmb(posi5);
    if abs(comp3) > 0 & abs(comp3) < 60
        posi=posi3;
    elseif abs(comp5) > 0 & abs(comp5) < 60
```



```
        posi=posi4;
    else
        posi=posi4;
    end
end
if minval == 50
    posi6=1;
    cont10=1;
    while cont10<=ndmb
        resta6=minval-abs(valor(cont10));
        if resta6 == 0
            posi6=posi6+cont10;
            break
        end
        cont10=cont10+1;
    end
    if tmb(posi6) == 0
        comp6=tmm(cont2)-235960;
    else
        comp6=tmm(cont2,1)-tmb(posi6);
    end
    cont11=1;
    while cont11<=ndmb
        resta7=minval-abs(valor(cont11));
        if resta7 == 0
            posi7=cont11;
        end
        cont11=cont11+1;
    end
    comp7=tmm(cont2)-tmb(posi7);
    if comp6 == comp7
        posi=posi6;
    else
        posi=posi7;
    end
end
if minval>50
    cont12=1;
    while cont12<=ndmb
        resta8=minval-abs(valor(cont12));
        if resta8==0
            posi=cont12;
        end
        cont12=cont12+1;
    end
end
AMag(cont2,1)=tmb(posi);
deltaF(cont2)=(rlmc(1)*tmm(cont2)+rlmc(2))-Fmb(posi);
AMag(cont2,2)=(Fmm(cont2)-deltaF(cont2))-mean(Fmb);
waitbar(cont2/ndmb)
end
close(barra);
[newfile,newpath] = uiputfile('out.dat','MagneKit 1.0');
if newfile==0 & newpath==0
    seguro=questdlg('Estas seguro que no quieres guardar el resultado?','...
    'MagneKit 1.0','Si','No','Si');
    if strcmp(seguro,'No')
        while strcmp(seguro,'No')
            [newfile,newpath]=uiputfile('out.dat','MagneKit 1.0');
            seguro=questdlg('Estas seguro que no quieres guardar el resultado?','...
            'MagneKit 1.0','Si','No','Si');
        end
    end
end
if newfile==0
    archout=strcat(newpath,newfile);archout=strcat(archout,'.dat');
```

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

```
espera=waitbar(0,'Escribiendo el archivo de salida');  
waitbar(0.3333)  
dlmwrite(archout,AMag,'\t');  
waitbar(1);  
close(espera);  
end
```

Este programa está diseñado para el cálculo de la corrección por variación diurna del campo geomagnético y como entrada a dicho programa se debe tener un archivo de datos con el siguiente formato:

Se requiere un archivo con cuatro columnas de datos, en las cuales la primera deberá tener el tiempo en el que el dato fue tomado, en la segunda el valor del campo (leído del magnetómetro), ambas columnas se refieren a los datos del magnetómetro con el que se realizó el levantamiento. En la tercer columna deberá tenerse el tiempo del dato y en la cuarta el valor del campo; para el caso de la tercera y cuarta columna, se refiere a los datos de la base, es decir, del magnetómetro que queda fijo. Éste archivo debe ser de texto delimitado por tabulaciones.

Ejemplo del contenido de un archivo de entrada, llamémosle entrada.dat:

202912	412158	200000	413638
202933	412370	200100	413646
202948	413170	200200	413602
203001	413132	200300	413628

Debe tenerse especial atención en que las primeras dos columnas tengan el mismo número de datos que las columnas tres y cuatro. De no ser así el archivo deberá completarse de la siguiente forma:

204600	413208	205000	413386
204614	413324	205100	413658
204629	413220	205200	413640
204645	413548	205300	413208
999	999	205400	413618
999	999	205500	413634

o bien de la siguiente forma:

235021	414250	5700	413466
235110	413402	5800	413566
235121	412582	5900	413578
235139	412122	10000	413552
235151	412554	999	999

es decir, que cuando el número de datos sea menor deberá completarse con el número 999.

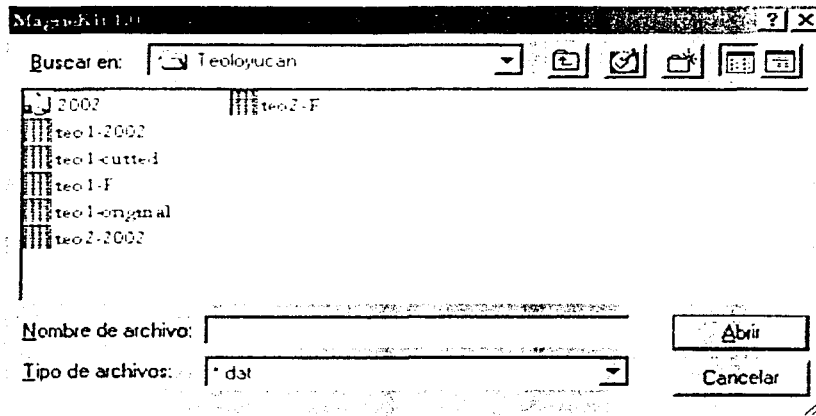
Como restricción de este programa se tiene que el archivo de entrada no deberá exceder 24 horas continuas de registro, esto es, si el primer dato de tiempo es por ejemplo 221000, el último dato de tiempo,

como máximo, deberá ser 220900. Esto implica que aunque no se permiten registros mayores de 24 horas, si se permiten datos de cambio de día, por ejemplo:

232401	412666	235900	413588
232435	412770	0	413594
232546	412706	100	413436

Se presenta a continuación un ejemplo de cómo ejecutar el programa: en la línea de comandos de Matlab se debe teclear el nombre del programa, en éste caso *codi*, y aparecerá una ventana como la siguiente:

En la cual deberá seleccionarse el archivo que contiene los datos para el proceso. A continuación, y después de realizados los cálculos, aparecerá una segunda ventana, muy parecida a la anterior, pero en este caso se pedirá el nombre y la ubicación para el archivo que contiene el resultado del proceso.



Dicho archivo que contendrá los cálculos del proceso, tiene el mismo formato que el de entrada, es decir, texto delimitado por tabulaciones, sólo que en este caso contendrá dos columnas, en la primera el tiempo y en la segunda el valor de la anomalía total.

### Reducción al polo

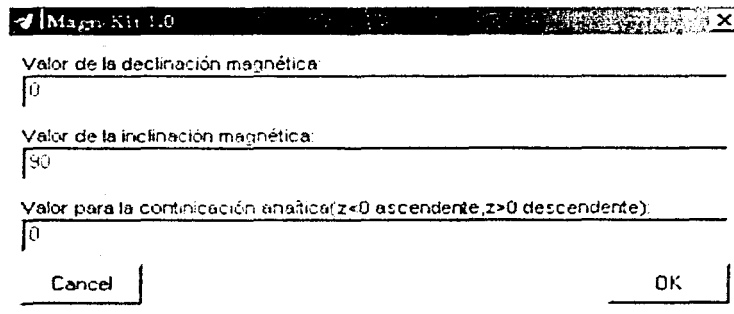
```
clear;
[datafile,datapath]=uigetfile('*.dat','MagneKit 1.0');
while datafile==0 & datapath==0
    err=errordlg('Necesitas seleccionar un archivo',...
    'MagneKit 1.0');
    waitfor(err,'Close');
    [datafile,datapath]=uigetfile('*.dat',...
    'Selecciona el archivo para el procesado');
```

```
end
InFile=strcat(datapath,datafile);
MAM=dlmread(InFile, '\t');
promptstr={'Valor de la declinación magnética:',...
'Valor de la inclinación magnética:',...
'Valor para la continuación analítica(z<0 ascendente, z>0 descendente):'};
initstr=('0', '90', '0');
titlestr='MagneKit 1.0';
nlines=1;
result=inputdlg(promptstr,titlestr,nlines,initstr);
Dc=str2num(result{1});
In=str2num(result{2});
z=str2num(result{3});
vaux=size(MAM);
N=sqrt(vaux(1,1));
Tx=abs(MAM(1,1)-MAM(2,1));
Ty=abs(MAM(N,2)-MAM(N+1,2));
N2=N./2;
N2m1=N2-1;
media=mean(MAM,1); media=media(1,3);
for m=1:N
    for n=1:N
        dT(m,n)=MAM(n+(m-1).*N,3)-media;
    end
end
FdT=fft2(dT);
FixFdT=(fftshift(FdT));
NTx=Tx.*N;
NTy=Ty.*N;
[EW,SN]=meshgrid(0:N-1,0:N-1);
x=EW.*Tx;
y=SN.*Ty;
p=EW./NTx;
q=SN./NTy;
[EW,SN]=meshgrid(-N2:N2m1,-N2:N2m1);
ps=(EW./NTx).*(2*pi);
qs=(SN./NTy).*(2*pi);
In=In*pi/180;
Dc=Dc*pi/180;
barra = waitbar(0,'Haciendo los cálculos...');
for qq=1:N
    for pp=1:N
        upexp=(ps(1,pp)^2+qs(qq,1)^2)*exp(sqrt(ps(1,pp)^2+qs(qq,1)^2)*z);
        downexp=(i*ps(1,pp)*cos(In)*cos(Dc))+(i*qs(qq,1)...
```

```
        *cos(In)*sin(Dc))+sqrt(ps(1,pp)^2+qs(qq,1)^2)*sin(In))^2;
    if downexp==0
        FixFrtpp(qq,pp) = 1;
    else
        FixFrtpp(qq,pp) = upexp/downexp;
    end
end
waitbar(qq/N);
end
Frtpp=ifftshift(FixFrtpp);
FixFdTrtp = FixFdT.*FixFrtpp;
FdTrtp = ifftshift(FixFdTrtp);
dTrtp = ifft2(FdTrtp);
dTrtp = dTrtp./2*pi;
close(barra);
barra = waitbar(0,'Haciendo la matriz del resultado...');
for m=1:N
    for n=1:N
        B(n+(m-1).*N,1)=MAM(n+(m-1).*N,1);
        B(n+(m-1).*N,2)=MAM(n+(m-1).*N,2);
        B(n+(m-1).*N,3)=real(dTrtp(m,n));
    end
    waitbar(m/N)
end
close(barra);
[newfile,newpath] = uiputfile('out.dat','MagneKit 1.0');
if newfile==0 & newpath==0
    seguro=questdlg('Estas seguro que no quieres guardar el resultado?',...
        'MagneKit 1.0','Si','No','Si');
    if strcmp(seguro,'No')
        while strcmp(seguro,'No')
            [newfile,newpath]=uiputfile('out.dat','MagneKit 1.0');
            seguro=questdlg('Estas seguro que no quieres guardar el resultado?',...
                'MagneKit 1.0','Si','No','Si');
        end
    end
end
if newfile==0
    archout=streat(newpath,newfile);archout=streat(archout,'.dat');
    espera=waitbar(0,'Escribiendo el archivo de salida');
    waitbar(0.3333)
    dlmwrite(archout,B,'\t');
    waitbar(1);
    close(espera);
end
```

```
end
refresh
subplot(2,1,1)
surf(x,y,real(dTrtp))
grid on
zlim([min(min(real(dTrtp))) max(max(real(dTrtp)))]])
xlabel('EW (m)'); ylabel('SN (m)'); zlabel('Anomalia Total (nT)');
title('Superficie de Anomalia Total Reducida al Polo');
subplot(2,1,2)
contourf(x,y,real(dTrtp))
axis equal
xlabel('EW (m)'); ylabel('SN (m)');
title('Anomalia Total Reducida al Polo');
```

Este programa automatiza el cálculo de la reducción al polo y se requiere como entrada del programa, un archivo que contenga los datos de la anomalía. Dicho archivo deberá de ser de texto delimitado por tabulaciones (.dat), debe tener tres columnas de datos, en la primera se listara la coordenada x, en la segunda la coordenada y (ambas coordenadas deberán ser lineales), y en la última columna contendrá los datos de la anomalía. El archivo de los datos podra ser seleccionado en una ventana que aparecerá para tal efecto (similar a las de los programas anteriores). Para este caso se requiere de otros tres datos y para ello, después de haber seleccionado el archivo de entrada, aparecera una ventana como la que a continuación se muestra:

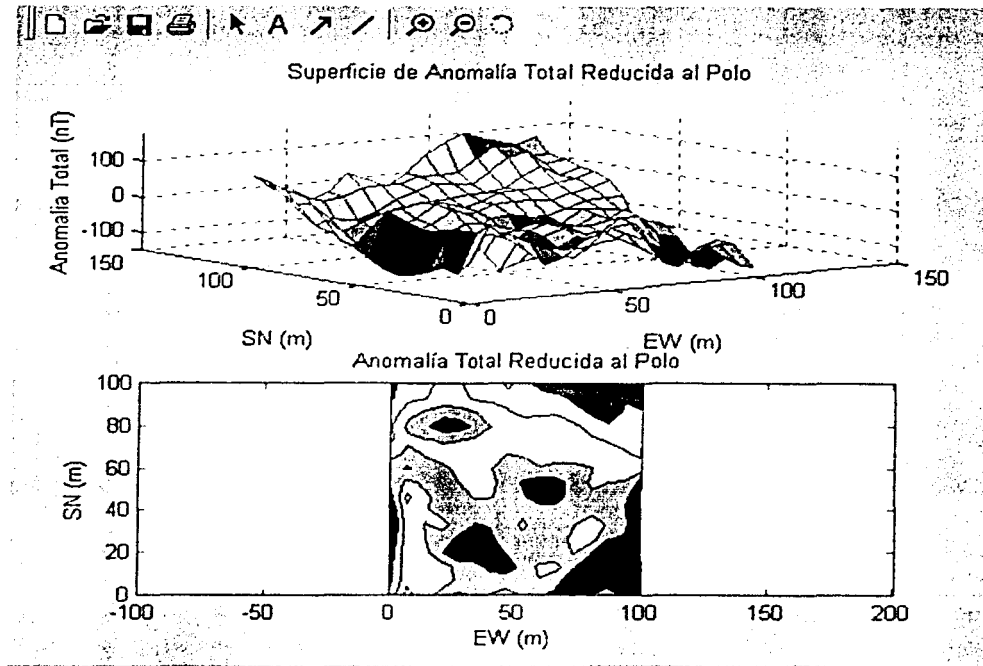


The image shows a dialog box titled "Magn. Kit 1.0" with a close button (X) in the top right corner. It contains three input fields with the following labels and values:

- Valor de la declinación magnética: 0
- Valor de la inclinación magnética: 90
- Valor para la continuación analítica (z<0 ascendente, z>0 descendente): 0

At the bottom of the dialog box, there are two buttons: "Cancel" on the left and "OK" on the right.

En esta ventana se proporcionaran los datos restantes y necesarios para la realización del cálculo de la reducción al polo. Enseguida se realiza el proceso y finalmente aparece una nueva ventana para dar el nombre del archivo en el que se guardara el resultado del calculo (si es que así se requiere), el formato de salida de dicho archivo es también de texto delimitado por espacios. Como parte final el programa proporciona una gráfico de visualización del resultado. Se muestra un ejemplo de dicho gráfico, y en el que la parte superior presenta la superficie (3-D) y en la parte inferior el mapa de contornos.



### Gradiente horizontal

```
clear
[datafile,datapath]=uigetfile('*.dat',...
    'MagneKit 1.0 ----> Gradiente Horizontal');
while datafile==0 & datapath==0
    err=errordlg('Necesitas seleccionar un archivo','MagneKit 1.0');
    waitfor(err,'Close');
    [datafile,datapath]=uigetfile('*.dat',...
        'Selecciona el archivo para el procesado');
end
archin=street(datapath,datafile);
MAM=dlmread(archin,'\t');
vaux=size(MAM);
cont0=1;
while cont0<vaux(1,1)
    z=MAM(cont0,2)-MAM(cont0+1,2);
    r=cont0;
    if z==0
        cont0=vaux(1,1);
    end
    cont0=cont0+1;
end
```

```
end
deltax=abs(abs(MAM(1,1))-abs(MAM(2,1)));
deltay=abs(abs(MAM(r,2))-abs(MAM(r+1,2)));
sumdis=2*deltax*2*deltay+4*sqrt(((deltax)^2)+((deltay)^2));
for s=1:(vaux(1,1)/r)-2
    n=3;
    for m=1:r-2
        maux(s,m)=(MAM(m+r*(s-1),n)+MAM(m+1+r*(s-1),n)+MAM(m+2+r*(s-1),n)...
            +MAM(m+r*(s-1)+r,n)+MAM(m+2+r*(s-1)+r,n)+MAM(m+r*(s-1)+2*r,n)...
            +MAM(m+1+r*(s-1)+2*r,n)+MAM(m+2+r*(s-1)+2*r,n))/sumdis;
    end
end
vaux1=0;
for cont1=1:s
    for cont2=1:m
        mgh(cont2+vaux1*m)=maux(cont1,cont2);
    end
    vaux1=vaux1+1;
end
mgh=mgh';
maximo=max(mgh);
minimo=min(mgh);
vaux2=size(mgh);
barra = waitbar(0,'Haciendo los cálculos...');
for cont3=1:3
    if cont3==1
        for cont4=1:s
            for cont5=1:m
                MGH(cont5+m*(cont4-1),cont3)=deltax*cont5;
            end
        end
    elseif cont3==2
        for cont6=1:s
            for cont7=1:m
                MGH(cont7+m*(cont6-1),cont3)=deltay*cont6;
            end
        end
    elseif cont3==3
        for cont8=1:vaux2(1,1)
            MGH(cont8,cont3)=mgh(cont8,1);
        end
    end
    waitbar(cont3/3);
end
```



```
close(barra);
[newfile,newpath] = uiputfile('out.dat','MagneKit 1.0');
if newfile==0 & newpath==0
    seguro=questdlg('Estas seguro que no quieres guardar el resultado?',...
        'MagneKit 1.0','Si','No','Si');
    if strcmp(seguro,'No')
        while strcmp(seguro,'No')
            [newfile,newpath]=uiputfile('out.dat','MagneKit 1.0');
            seguro=questdlg('Estas seguro que no quieres guardar el resultado?',...
                'MagneKit 1.0','Si','No','Si');
        end
    end
end
if newfile==0
    archout=strcat(newpath,newfile);archout=strcat(archout,'.dat');
    espera=waitbar(0,'Escribiendo el archivo de salida');
    waitbar(0.3333)
    dlmwrite(archout,MGH,'\t');
    waitbar(1);
    close(espera);
end
refresh;
surf(maux)
shading interp
colormap(jet)
title('Superficie de Gradiente Horizontal')
```

Este programa fue diseñado para hacer el cálculo del gradiente horizontal de una malla de datos (rectangular y con al menos 3x3 datos), como entrada el programa requiere de un archivo de datos, con formato de texto delimitado por tabulaciones.

El archivo debe constar de 3 columnas, en la primera se listará la coordenada X (dirección E-W), la segunda columna contendrá la coordenada Y (dirección N-S), y por último en la tercera columna se dará el dato de anomalía magnética correspondiente al punto con coordenadas (x,y).

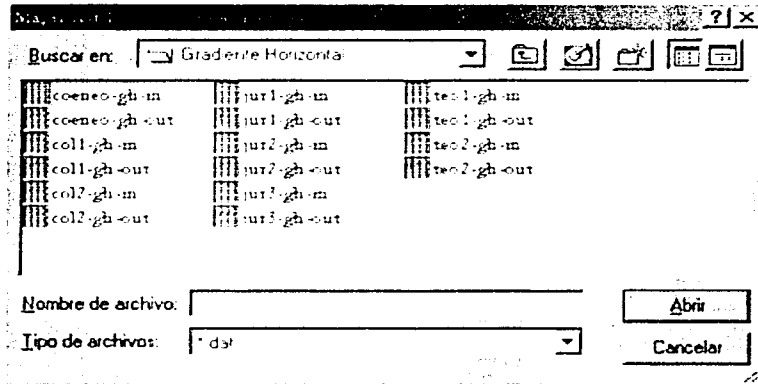
Ejemplo de un archivo de entrada para este programa:

0	0	-31.8
2	0	-29.875114343154
4	0	-28.409031268265
0	2	-34.197807479879
2	2	-32.936020619234
4	2	-31.766997288875
0	4	-36.79202072436
2	4	-35.712794723127

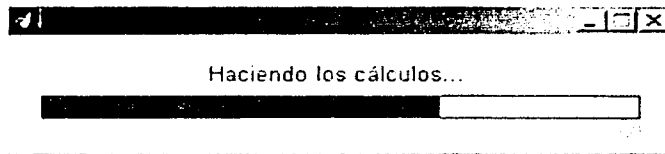
Debe tenerse en cuenta que los datos deben ser consecutivos, esto es que no podemos empezar a listar 0, 2, luego 6 y después 4 (sólo en X y Y), esto es incorrecto, causará problemas y desde luego acarreará errores en el programa.

El programa no tiene restricción en cuanto al número de datos o precisión de los mismos. Se presenta a continuación un ejemplo de la ejecución del programa:

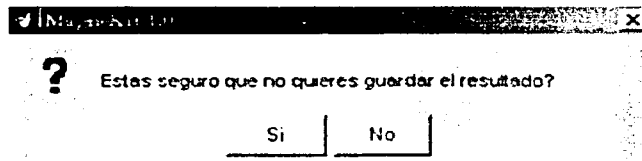
Como primer paso en la línea de comandos de Matlab habrá de teclearse *gh2*, con esto invocamos al programa y aparecerá una ventana como la siguiente:



En esta ventana seleccionamos el archivo que contiene los datos necesarios para el procesado de los datos, acto siguiente se realizan los cálculos y tendremos una barra de estado para ver el progreso.



Enseguida en una ventana similar a la primera se proporcionará el nombre del archivo que contendrá el resultado del proceso, es opcional ya que si decidimos cancelar esa operación aparecerá una pregunta, por si lo hicimos por accidente, para confirmar que no queremos salvar el resultado.



### ANEXO 3

#### Especificaciones y programación del Magnetómetro G-856:

**Resolución:** 0.1 nT

**Precisión:** 0.5 nT

**Reloj:** Día Juliano, precisión de 5 seg. por mes

**Sintonización:** Automática o manual, rango de 20 000 a 90 000 nT.

**Tolerancia del Gradiente:** 1000 nT/metro.

**Ciclos de tiempo:** estándar de 3 a 999 seg, puede ser seleccionado manualmente como un rápido ciclo de tiempo de 1.5 seg.

**Lecturas:** Manual, o automática para una estación base.

**Memoria:** 5700 lecturas en campo o 12500 lecturas como estación base.

**Display de salida:** display de seis dígitos de FIELD/TIME, display de tres dígitos auxiliares para el número de línea, día.

**Salida digital:** RS-232, a 9600 baudios.

**Entrada:** Acepta ciclos de comandos externos.

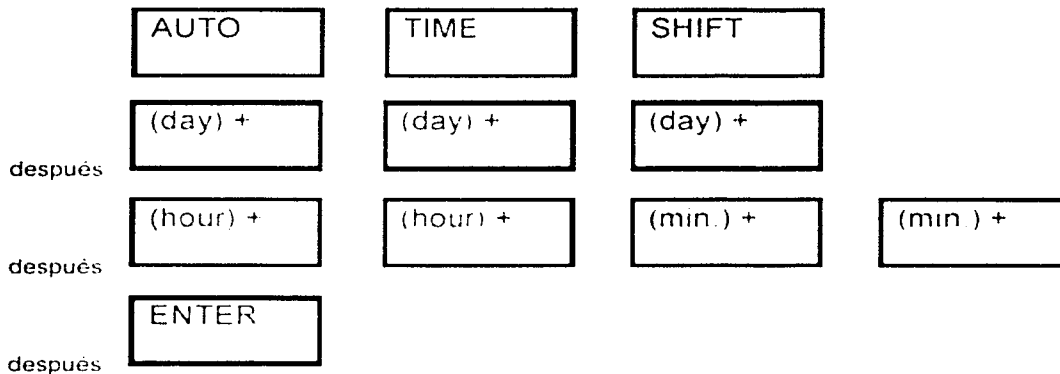
**Consola:** 18 x 27 x 9 cm, 2.7 Kg

**Sensor:** 9x 13 cm, 1.8 Kg.

**Ambiente:** las especificaciones son dentro de 0 a 40 °C, puede operar satisfactoriamente de -20 a 40 °C.

**Energía:** 9 pilas tamaño D de 1.5 volts.

Para la programación del reloj y de la fecha (en día juliano) es la siguiente:



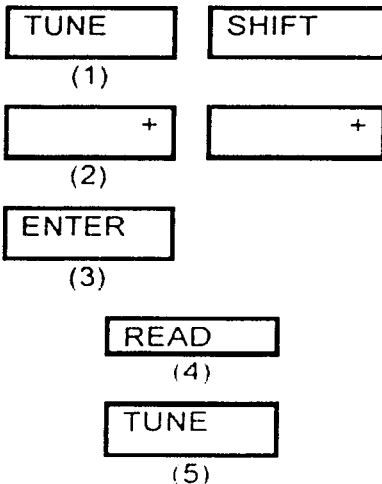
#### Sintonización del Magnetómetro

El motivo de sintonizar el magnetómetro es por la misma causa que los radios comunes con la finalidad de lograr una mejor recepción de la señal de respuesta del campo geomagnético, normalmente las lecturas pueden ser exactas dentro de los 3000 nT del campo total, la sintonización es necesaria para cada estudio, en nuestro caso, como se utiliza de manera constante, solo será necesario hacer este ajuste cuando falle el equipo por diferentes causas, como es el suministro de energía eléctrica o por alguna falla técnica.

Para sintonizar el magnetómetro:

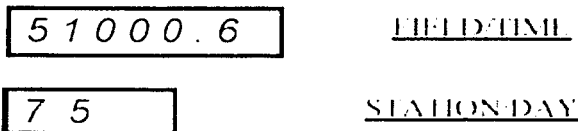
- Se utiliza un mapa de campo total de la zona para introducir al magnetómetro un valor mas acertado.
- Se sintoniza con tres dígitos, por ejemplo 280 que son 28000 nT.
- Se toma una lectura.
- Se sintoniza para comparar la lectura obtenida.

Se tendrá que oprimir la siguiente secuencia:



a. Se presiona **TUNE** **TUNE**

- Cuando se presiona **TUNE**, un número aparecerá en el display.



- Esta es la intensidad de la señal, su rango va de 0.0 a 9.9, que describe la intensidad de la señal recibida en la medición previa.

Después de la Intensidad de la señal, el valor sintonizado aparecerá en el display.



Este número será leído como 51 000 nT, el rango de sintonización esta entre 20000 y 90000 nT.

- b. Lo siguiente es decidir si el valor de la sintonización es válido, de ser necesario se puede introducir un nuevo valor de sintonización.

Se presiona SHIFT, para acceder los números.

Se presionan los nuevos números de la nueva sintonización, por ejemplo:

(56000 nT).

- Se presiona ENTER, cuando ENTER esté presionado se activará el nuevo valor. El display se pondrá en blanco. Se tendrá que hacer una revisión de la sintonización tomando una lectura.
- Se presiona READ.
- Si se quiere revisar la intensidad de la señal almacenada de la nueva sintonización. Se presiona TUNE.

Se desplegará un número de la intensidad de la señal. Por ejemplo:

FIELD/TIME

STATION/DAY

- Si es satisfactoria la intensidad de la señal, se podrá iniciar el estudio.

#### Configuración del Modo Automático

El modo automático del magnetómetro permite tomar grabaciones en intervalos de tiempo especificados. Cuando el magnetómetro es usado de esta forma, sirve como estación base para la observación de la variación diurna, y así para hacer correcciones de levantamientos de campo.

El G-856 almacena alrededor de 12700 lecturas en el modo automático, que es mucho más que en el caso de levantamientos geomagnéticos (5000 lecturas). La razón de esto, es que el intervalo de tiempo es constante, así que los tiempos de las lecturas son calculados al momento de ser recuperados.

El procedimiento para seleccionar el intervalo de muestreo es el siguiente.

Se presiona:

(1)  
    
(2)  
  
(3)

Ejemplo.

Se presiona

El display se iluminará con un número

AUTO

FIELD/TIME

1 20

STATION/DAY

Esto es un intervalo de muestreo en segundos, si se desea esta configuración, se presiona ENTER (paso (c)) y el magnetómetro empezará a tomar las lecturas cada 120 segundos. Si se necesita cambiar el intervalo de muestreo, se presiona SHIFT para acceder los números. El display mostrará espacios.

Lo siguiente es teclear el nuevo intervalo de muestreo, por ejemplo, 60 segundos, el display se llenará con esos números, durante 5 segundos, se presiona ENTER, si ENTER no esta presionado durante 5 segundos la configuración sera borrada cuando se presiona ENTER el magnetómetro empezará a tomar y almacenar las lecturas automaticamente.

Ese es un arreglo interno de la Opción Switch que permite que el display se apague en el modo automático para ahorrar el consumo de energía de las baterías.

- Para leer la memoria durante el modo automático, se presiona RECALL y FIELD o TIME como sea deseado. El día juliano será desplegado con TIME.
- Para acceder al tiempo real.

Se presiona TIME

El display FIELD/TIME se iluminará con el tiempo real y el display STATION/DAY se iluminará con el número de línea.

#### Extracción de los Datos del Magnetómetro

Los datos pueden ser extraídos de manera manual o automática.

Para realizarlo automáticamente, se necesita conectar el magnetómetro G-856 previamente a un equipo auxiliar (computadora, impresora, grabadora de cintas magnéticas o a otro magnetómetro) usando un cable RS-232

OUTPUT

ENTER

Se presiona

La información almacenada en memoria, empieza con el primer número de la estación, será automáticamente transmitida. El primer número de la estación se desplegará, de esta forma se podrá monitorear el progreso. Para detener el proceso, se persona CLEAR. Los datos permanecerán en memoria hasta que sean borrados.

Se puede iniciar el envío en cualquier número de estación. La secuencia de teclas para inicial la transmisión de datos desde el numero de estación 123 será

OUTPUT

Se presiona

SHIFT

Después

1, 2, 3

Se teclean los números deseados, por ejemplo:

ENTER

Se presiona

El G-856 iniciará la transmisión de datos en el número de estación designada.

### Borrado de Datos

El G-856 permite borrar las lecturas anteriores o un grupo de lecturas anteriores.

- a. Borrado de datos, lectura anterior.

Procedimiento.

READ

RECALL

ERASE

ERASE

READ

Se presiona

La tecla READ moverá el apilado de la memoria a la posición de la lectura anterior tomada.

RECALL

Se presiona

La lectura anterior tomada aparecerá en el display.

Cuando los valores aparecen en los displays:

ERASE

Se presiona dos veces.

El display se pondrá en blanco y la lectura ya fue borrada de la memoria.

Si accidentalmente es presionado ERASE, se presiona CLEAR o cualquier otra tecla y la operación será cancelada.

- b. Borrado de datos, el último grupo.

Para borrar el último grupo de lecturas, primero se determina el número de estación que se desea borrar. Todos los datos serán borrados desde el número de estación hasta la última lectura almacenada en memoria.

RECALL

SHIFT

(station)+

(station)+

(station)+

(se teclean el número de la estación).

ENTER

ERASE

ERASE

Se presiona **RECALL** para acceder a la memoria y se presiona.

**SHIFT** para acceder los número con las teclas.

Se presiona el número de la estación que se desea ser borrada, por ejemplo 748.

Se presiona **ENTER** el display se iluminará con el número 748 y las lecturas de campo tomadas en la estación. Cuando el display muestre las lecturas,

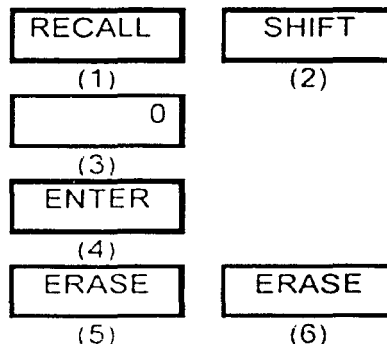
Se presiona **ERASE** **ERASE** el display quedará en blanco y todos los datos desde 748 hasta la lectura anterior serán borrados de la memoria. ERASE deberá ser presionado dos veces para que los datos sean borrados.

c. Borrado de datos, memoria completa.

Para dejar la memoria completamente limpia de información, se necesita ingresar el número de la primera estación (0) y presionar

**ERASE** dos veces

Después presionar la secuencia:



Se presiona **RECALL** para acceder a la memoria y se presiona **SHIFT** para acceder los números con las teclas.

Se presiona 0, que es el número de la primera estación en la memoria.

Se presiona **ENTER** los display mostraran 0 y las lecturas tomadas en campo en esa estación. Cuando los displays lo muestren,

Se presiona **ERASE** **ERASE** Los displays quedarán en blanco y la memoria quedará totalmente limpia



### Sensor Attachment

Dentro del estuche del sensor, esta una bobina de alambre sumergida en un hidrocarburo.

1. Para revisar el fluido del sensor se le da una sacudida para cerciorarse de que este listo para realizar el sondeo. El fluido deberá estar alrededor de 1 cm. de la parte más alta. Si se necesita agregar fluido se realiza lo siguiente:
  - a) Remover el tapón azul del sensor.
  - b) Llenar con el fluido, hasta 1 cm de la parte más alta.
  - c) Para colocar el tapón nuevamente, se utiliza tellón para evitar los derrames.
2. Se conecta el cable al sensor.
3. Se le agregan las secciones de tubo.

### Orientación del sensor

El sensor se encuentra marcado con una flecha y la letra "N" . durante la operación esta marca deberá estar orientada hacia el norte, de esta forma la bobina estará en forma perpendicular al campo geomagnético de la tierra y producirá mejores lecturas. Si se encuentra alineado en cualquier otra dirección, disminuirá la amplitud de la señal.

### La interfase RS-232

Solo 3 de 22 líneas de transmisión son usadas en el RS.232, es conectado a una PC por un puerto serial de 9 pines.

La siguiente lista muestra el uso para cada pin del cable RS-232 del G-856.

Conector RS-232 de 9-pins	Panel frontal del G-856	Descripción de la función
2	T	Transmisión de datos desde el G-856
5	D	Tierra, señal cero de la interfase
7	G	Limpia para mandar, cuando es baja, impide la salida del G-856, no es abierto sino se usa.

El G-856 funciona con un voltaje de  $\pm 12$  volts, pero puede operar con un voltaje de 5 a 25 volts, en algunos casos se requiere de un cable RS-232 largo para realizar la conexión, para esto es necesario tener los 12 volts para un buen funcionamiento.

### Panel frontal del conector

<u>Pin</u>	<u>Función</u>	<u>Comentario</u>
A	Sensor	

B	Sensor	
C	Protector del sensor	
D	Tierra	Energía y control de tierra.
E	No conectado	
F	Datos aceptados	Entrada del dispositivo externo.
G	Limpia para mandar	
H	Positivo de la batería	Conectado ala batería interna.
J	Dato 0	
K	Dato 1	
L	Dato 2	
M	Dato 3	
N	Datos validos	
P	Fin de datos	
R	Energía del instrumento	Energía externa de entrada
S	Sincronización	Lecturas Externas/Comando de almacenamiento
T	Transmisión de datos	
U	Recepción de datos	

Formato de salida

El formato de salida de datos para el G-856 y BCD es la siguiente:

- a. Cada carácter transmitido es en código ASCII y es el siguiente:
  - 1 bit de inicio (siempre lógico "1").
  - 7 bits de datos (código ASCII).
  - 1 bit de paridad (siempre lógico "0").
  - 2 bits de final (siempre lógico "0").
- b. Cada línea de transmisión del G-856 consiste de 29 caracteres ASCII:

Espacio o asterisco (*)	1
Número de líneas	3
Espacio	1
Día juliano	3
Espacio	1
Tiempo	6
Espacio	1
Número de estación	4
Espacio	1
Campo	6
Regreso a la línea	2

- c. Después los datos son transmitidos por el G-856, un carácter final (ASCII EOT) es transmitido.
- d. La transmisión de datos se inicializa:

- Presionando **Output**: display: Out.
- Opcional: Presionando **Shift**, NNN, para iniciar la salida desde la estación NNN.

Presionando **Enter**: el display empezará a parpadear con los números en la ventana baja incrementándose con cada estación transmitida.

#### Energía externa

El G-856 puede trabajar con energía externa si es deseado. Para esta aplicación, se conecta una batería de 12 volts con el positivo al el pin R y el negativo al pin D, es bueno instalar un fusible de 2 amperes en la línea de energía (G-856 Memori.MagTM, Proton Precession Magnetometer, MANUAL DEL OPERADOR, GEOMETRICS, INC.1995).

## BIBLIOGRAFÍA

- Blakely, Richard J., 1995. POTENTIAL THEORY IN GRAVITY AND MAGNETIC APPLICATIONS. Cambridge University Press.
- Campbell, W.C., 1997. INTRODUCTION TO GEOMAGNETIC FIELD. Cambridge University Press
- Cañon Amaro C., 1989. MÁS DE UN SIGLO DEL OBSERVATORIO MAGNÉTICO. Comunicaciones Técnicas, Serie Docencia y Divulgación, Instituto de Geofísica UNAM.
- Consejo de Recursos Minerales, 1999. CARTA MAGNÉTICA DE CAMPO TOTAL. Colima E13-3 Estado de Colima.
- Consejo de Recursos Minerales, 1999. CARTA MAGNÉTICA DE CAMPO TOTAL. Morelia E14-1 Estado de Michoacán
- Consejo de Recursos Minerales, 1998. CARTA MAGNÉTICA DE CAMPO TOTAL. Querétaro F14-10 Estado de Querétaro.
- Consejo de Recursos Minerales, 1994. MONOGRAFÍA GEOLÓGICA-MINERA DEL ESTADO DE COLIMA. Primera Edición.
- Geo Forschungs Zentrum Potsdam in der Helmholtz-Gemeinschaft, Alemania  
[http://www.gtz-potsdam.de/pb2/pb23/niemeqk/kp\\_index/quietdst/](http://www.gtz-potsdam.de/pb2/pb23/niemeqk/kp_index/quietdst/)
- GEOMETRICS, INC., 1995. G-856 Memor.MagTM, Proton Precession Magnetometer, MANUAL DEL OPERADOR.
- Hernández-Ordóñez R., E. Vélez Arteaga, C. Arango Galván G. Cifuentes Nava y J. E. Hernández Quintero, 1999. ANALISIS PRELIMINAR DE LA VARIACIÓN SECULAR EN EL OBSERVATORIO MAGNÉTICO DE TEOLOYUCAN (TEO) Y SU COMPARACION CON EL IGRF. Reportes Internos, Instituto de Geofísica UNAM.
- Hernández-Ordóñez R., Carlos Lora, Gerardo Cifuentes, Esteban Hernández y Román Pérez, 2001. ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA INSTALACION DE UN OBSERVATORIO MAGNÉTICO ESTÁNDAR EN JURIUQUILLA, QUERÉTARO. Instituto de Geofísica UNAM.
- Hernández-Quintero J.E., 2002. INTERPRETACIÓN GLOBAL DE ANOMALÍAS CORTICALES SATELITALES SOBRE LA REPUBLICA MEXICANA. Tesis de Maestría, Instituto de Geofísica, UNAM.

Institut Royal Meteorologique de Belgique, Centre de Physique du Globe, FLUXGATE MAGNETOMETER ELECTRONICS TYPE FLM1/A, OWNER'S MANUAL.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI)

[www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx) México, 2000.

Jankowski, J. and Sucksdorff, C., 1996. GUIDE FOR MAGNETIC MEASUREMENTS AND OBSERVATORY PRACTICE. International Association of Geomagnetism and Aeronomy.

López Ramos, E., 1979. GEOLOGÍA GENERAL DE MÉXICO.

Muniz Barreto, L. 1997. EL GEOMAGNETISMO. Cuadernos del Instituto de Geofísica UNAM.

Negi, J. G. and Saraf, P. D., 1989. ANISOTROPY IN GEOELECTROMAGNETISM. Methods in geochemistry and geophysics, 28. Elsevier.

Primdahl F., 1979. The fluxgate magnetometer, Jour. Sci. Instrum., 12, 241-253.

Reyes V. 1884. MEMORIA SOBRE EL DEPARTAMENTO MAGNÉTICO DEL OBSERVATORIO METEOROLÓGICO CENTRAL DE MÉXICO. Oficina Tip. de la Secretaría de Fomento.

Telford W.M., Geldart L. P. and Sheriff R. E., 1990. APPLIED GEOPHYSICS. Second Edition. Cambridge University Press.

Tejero Andrade, A. APUNTES DE TEORÍA DEL POTENCIAL APLICADA A LA GEOFÍSICA. Facultad de Ingeniería, UNAM.

U. S. Naval Observatory, Astronomical Application Department.

[http://aa.usno.navy.mil/data/docs/WebMICA\\_2.html](http://aa.usno.navy.mil/data/docs/WebMICA_2.html)

Wolff, C. J.M. and de Wardt, J.P., 1980. BOREHOLE POSITION UNCERTAINTY, ANALYSIS OF MEASURING METHODS AND DERIVATION OF SYSTEMATIC ERROR MODEL. Paper SPE 9223 Presentada en 55th Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Sept. 21-24.

Wiennert, K. A., 1970. NOTES ON GEOMAGNETIC OBSERVATORY AND SURVEY PRACTICE. Unesco.

Zavala Sánchez G. V., 2002. MODELO GEOELECTRICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE QUERÉTARO. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.