



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA TIERRA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ EXAMINANDO LAS ESTRUCTURAS
DEL TALUD CONTINENTAL FRENTE
A LA COSTA DE VERACRUZ CON
DATOS DE BATIMETRÍA Y
MAGNETOMETRÍA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A :

IVÁN ARIEL RUFINO CONTRERAS

DIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS A. Q. MORTERA GUTIÉRREZ

JURADO:

DR. RICARDO J. PADILLA Y SÁNCHEZ

M. en. C. DAVID ESCOBEDO ZENIL

DR. WILLIAM L. BANDY

DR. OSVALDO SÁNCHEZ ZAMORA



CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F., FEBRERO 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

SR. IVÁN ARIEL RUFINO CONTRERAS
Presente

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-1312

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Carlos A. Mortera Gutiérrez y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

EXAMINANDO LAS ESTRUCTURAS DEL TALUD CONTINENTAL FRENTE A LA COSTA DE VERACRUZ CON DATOS DE BATIMETRÍA Y MAGNETOMETRÍA

RESUMEN
I INTRODUCCIÓN
II ANTECEDENTES
III METODOLOGÍA Y DATOS
IV RESULTADOS
V INTERPRETACIÓN
VI CONCLUSIONES
REFERENCIAS
APÉNDICE

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., 7 de Octubre de 2008
EL DIRECTOR

MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA

JGGZ*BJPYS*sr5

AGRADECIMIENTOS

A la mejor del mundo, la UNAM.

A Papá, por ser el principal causante de despertar mi interés en las Geociencias. Y a Mamá por siempre tener algo alentador que decirme como “¡Ya párate que ya es tardeeee!”.

A mi tutor, el Dr. Carlos Mortera Gutiérrez por su tiempo y confianza desde SIGSBEE10, pasando por la elaboración de mi trabajo de tesis y hasta los proyectos que se llevaron a cabo mientras formé parte de ese equipo de trabajo, *Geofísica Marina*.

Al Dr. W. L. Bandy por la asesoría sobre los datos magnéticos y por estar siempre de excelente humor.

A todo el personal científico y marino del B/O *Justo Sierra* durante la campaña PMAG01 ya que de ahí surgió la materia prima para este trabajo.

A todos quienes formamos parte de la campaña SIGSBEE11, cuyos datos también utilicé.

Al Ing. Gerardo Cifuentes Nava por el registro de base magnética realizado en Antón Lizardo, Veracruz, datos que también utilicé en esta tesis. También gracias por ayudarme a realizar mi servicio social.

A la Dra. Elva Escobar B. por las experiencias adquiridas durante las campañas en SIGSBEE.

A todos los investigadores, amigos, compañeros, etc., que me acompañaron durante este tiempo en las campañas en Mar y Tierra (Chamela) pues todos en su momento contribuyeron en alguna medida a este trabajo.

A las tripulaciones de los buques oceanográficos *Justo Sierra* y *El Puma*, de la UNAM. Pues antes de subirme a esos buques no sabía lo mucho que me gustaba el mar y sino fuera por el trabajo que ellos hacen la *Geofísica Marina* no sería posible.

A:

Dr. Ricardo J. Padilla y Sánchez
M. en. C. David Escobedo Zenil
Dr. Osvaldo Sánchez Zamora

Por ser parte del jurado y mis profesores en su momento.

Y por supuesto a los amigos que también formaron parte de esta aventura; Diana, Pakito, J. Ramón, Dany, Sandy, Ely, Roberto, y como no quiero omitir a nadie, solo pongo a los que hacíamos tesis con el Dr. Mortera o el Dr. Bandy.

Quisiera agradecer a todas las personas que, incluso indirectamente, tuvieron que ver con la realización de esta tesis. Desafortunadamente siempre se puede uno olvidar de alguien así que no duden en reclamarme, ¡seguro fue por las prisas!.

DEDICATORIAS

Siempre he creído que una parte de la fuerza que nos impulsa a ir hacia adelante (la mayor parte tiene que venir de uno mismo) es inducida por la fuerza que emana de la gente que te rodea.

A Mamá y Papá, los amo.

Por nunca dejarme bajar los brazos, siempre serán una gran fuente de inspiración.

A Alma y Erik, mis hermanitos.

A Cesar, Vane y Fer porque siempre incluso en los momentos más complicados y gracias a esa bendita inocencia han sido motivo para sonreír.

A mi abuelita Rosa, por muchas cosas, pero sobre todo por ser quien me dio un regalo de cumpleaños que nunca olvidaré.

Llegó y se fue al último ese día, pero antes de salir me dio mi regalo diciéndome: “hijo te traigo esto porque pues ya sabes que no hay para más...” me dio una bolsita con algo envuelto en una servilleta y cuando lo abrí encontré unas galletas suaves de canela hechas en casa, muy ricas por cierto y que siempre me han gustado, siendo un niño no entendía porque la tenía que disculpar, ¡si además las galletas estaban bien buenas!. Lo que si sé es que vi en su rostro una satisfacción que solamente he visto en la gente que sabe dar por cariño, ese día me dio una gran lección de humildad que nunca dejará de estar presente en mis recuerdos.

A Mamita y Papito porque nunca podría olvidar sus rostros de felicidad e incluso lágrimas que me regalan cada vez que vengo o me voy (no sé si las lágrimas son porque regresé pero no importa jeje), ni los Septiembres que por mi cumpleaños me llevabas (Mamita) siempre a ver el desfile al centro (sin olvidar nunca mi paleta payaso) o el interminable cuento de Juan Pelotero (Papito) que a todos nos hacía preguntarnos lo mismo...

A mis primos; Oscar y José M., son mis carnales siempre.

A mis amigos:

Lucy, Héctor, Pablo, Josué, Edmundo, Arely, Taboada, Alejandro, Alejandra, Erik, David, Quique Gómez al cuadrado, etc. *Porque también fue una etapa importante la que pasé con uds.*

Aby, Jacky, Montse, Nadia, Valerie, Juan Pablo, Miguel Pinky, Omar Peluso, Picazo, Ricardo.

Por que en mayor o menor medida compartimos una gran experiencia; huelga '99-2000.

Y simplemente por ser grandes amigos.

Getza, Ely, Nora, Ixchel, Mariana. *Por tantos y tantos trámites que ni sirvieron para nada.*

La geobanda que en verdad es grande pero con mención especial para buenos amigos:

Xochitl, Itza, Ana C., Ana R., Juan Márquez, Daniel Mojojojo, Aide, Anais, Aurora, Magui, Brenda, Nely, Alejandro Manuel, Poncho y Eloisa, Ivonne, El Mechas, de nuevo Pakito, Dany y Sandy, ETC!!

Gina y Paty, porque si, pourquoi pas? Porque de cualquier forma se van a quejar jeje.

Bren H. H. por todo, por las sonrisas, desmañanadas, por ser así...

Muchas personas a lo largo de mi vida me han regalado un poco de si mismas, me han regalado un poco o mucho de su esencia. No pretendo ignorar a nadie, ni pretendo enaltecer a una persona por encima de alguien más, solo sé que escribir estos agradecimientos y dedicatorias es algo demandante pues aún siento que para completar mis pensamientos necesitaría (afortunadamente) mas hojas, mas espacio y sobre todo mas tiempo y calma para recordar al menos una cuarta parte de los detalles que me hacen sentir agradecido con todas esas personas. Pero algo que no puedo dejar de hacer es dedicar una gran parte de este esfuerzo; al mismo tiempo que pedirte a ti que alguna vez creíste en mi, que no dejes nunca de soñar, que nunca permitas que la realidad destruya los sueños al punto de volverlos desagradables, que no dejes que los recuerdos mueran sin haber sido atesorados ahí, *donde nunca sentirán frío*, que nunca dejes de desbordar el anhelo de un beso, que no dejes de reconocer donde esta el alma...

...esa parte de uno que nos da ...la vida.

No dejes de pensar en que los sueños se hicieron para no contarse, solo sigue soñando y si algún día me lo has de decir que sea al oído...

A mis tíos Flaco y Felipe.

A Alicia.

Por ser una luz que nunca se apagará para todos quienes te conocimos, ésta seguro es una tesis más que te dedicamos, pero espero que si nos encontramos un día, sonrías como siempre lo hacías por el puro gusto de volvernos a ver.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIAS	iv
ÍNDICE GENERAL	vi
RESUMEN.....	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES.....	4
II.1. Ubicación del levantamiento	4
II.2. Estudio Geofísico de 1971	5
II.3. Marco Geológico	9
II.3.1. Cuenca Sedimentaria del Golfo de México	9
II.3.2. Historia Geológica de la Cuenca del Golfo de México	12
II.3.3. Fisiografía y Batimetría	13
II.3.3.1. Talud Occidental de México.....	14
II.3.3.2. La Lengua de Veracruz	15
II.3.4. Actividad volcánica en el área	16
III. METODOLOGÍA Y DATOS	20
III.1. Levantamiento de Batimetría	22
III.1.1. Datos de batimetría.....	24
III.2. Magnetometría	26
III.2.1. Base Magnética en Tierra.....	29
III.2.2. Datos magnéticos marinos	31
III.2.3. Procesamiento de los datos magnéticos	33
IV. RESULTADOS	38
IV.1. Batimetría.....	38
IV.2. Magnetometría	42
IV.2.1. Base Magnética en Tierra	42
IV.2.2. Datos Magnéticos Marinos	44
V. INTERPRETACIÓN.....	58
V.1. Batimetría	58
V.2. Magnetometría	60
VI. CONCLUSIONES	62
REFERENCIAS	63
APÉNDICES.....	65

RESUMEN

Los procesos geológicos a lo largo de la zona de subducción son generadores de los riesgos sísmicos y volcánicos que afectan los márgenes de México en el Pacífico, pero hay pocas evidencias de estos riesgos en su margen del Golfo de México. En 1971, el Servicio Geológico de los Estados Unidos en colaboración con la UNAM realizó una campaña de geofísica marina en el Golfo de México a bordo del buque UNITEDGEO I, en la que se registraron datos de gravedad, magnetometría y reflexión sísmica a lo largo de perfiles transversales al margen occidental frente a la costa de Veracruz. De estos datos se infirieron por primera vez evidencias de la posible existencia de cuatro volcanes submarinos en el margen occidental del golfo. El objetivo de esta tesis es confirmar si existen los montes submarinos, llevando a cabo levantamientos de batimetría y magnetometría marina en tres áreas, reportados por Moore y Del Castillo [1974] como volcanes submarinos. En 2002 se llevó a cabo la campaña PMAG01 a bordo del B/O JUSTO SIERRA en que se realizaron los levantamientos de geofísica marina. Los resultados de los levantamientos de batimetría (en mapas de contornos y proyecciones del relieve topográfico en 3D) muestra que la morfología de la superficie del talud occidental del golfo está formada de un relieve conformado por dorsales y cañones submarinos propios de la actividad de drenaje de la plataforma continental hacia la planicie abisal de Sigsbee y no presentan evidencia morfológica de monte alguno de la isobata de 1,200 m de profundidad al quiebre de la plataforma con el talud continental (~200 m de profundidad) en las cuatro áreas. Los datos marinos de magnetismo registrados fueron reducidos para calcular la anomalía magnética en las tres zonas, utilizando la fórmula internacional del campo geomagnético de la época 2000-2005, corrigiendo por los efectos de las variaciones diurnas y de rumbo del buque. Las anomalías residuales se calcularon restándole el regional magnético asociado al talud en cada área. Ni las anomalías magnéticas calculadas o su residual presentaron algún lineamiento que estuviera asociado a la presencia de material magmático en el subsuelo marino. Las formas de las anomalías observadas presentan una tendencia asociada al talud que desaparece con la sustracción del regional. Los datos geofísicos de este estudio aportan evidencias para desechar la propuesta de Moore y Del Castillo [1974] de que existan formas magmáticas en el lecho marino de las tres áreas del talud continental que conforma el margen occidental del Golfo de México.

I. INTRODUCCIÓN

En 1974 se reportó la posible existencia de cuatro volcanes submarinos en el margen continental del Golfo de México, frente a las costas de Veracruz, basados en perfiles sísmicos de alta resolución, datos regionales de gravimetría y magnéticos que fueron obtenidos durante un estudio de geofísica marina [Moore and Del Castillo, 1974]. Los datos y perfiles geofísicos fueron registrados durante una campaña oceanográfica que fue llevada a cabo durante los meses de Mayo y Junio de 1971 en cooperación entre el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés). Esta campaña fue de las primeras investigaciones marinas que registraron en forma sistemática datos regionales de batimetría, gravedad, magnetismo y perfiles sísmicos del subsuelo marino en el sector sur-occidental del margen de la cuenca del Golfo de México. Estos registros están geo-referenciados con el sistema de satélites para navegación de los setentas. El objetivo de esta tesis es de analizar datos batimétricos y magnéticos que en 2002 fueron registrados en el talud del margen continental veracruzano [Mortera et. al., 2002] para estudiar las formas y propiedades magnéticas de tres montes submarinos que han sido referidos como volcanes submarinos en varias publicaciones de geología, por ejemplo en el libro “*The Gulf of Mexico Basin*”, de la serie “*The Geology of North America*”, [Salvador A., 1991].

En Marzo del 2002, se llevó a cabo la campaña oceanográfica *PMAG01* [Mortera et al., 2002] a bordo del B/O JUSTO SIERRA de la UNAM, para registrar datos batimétricos y magnetométricos a mayor detalle de las áreas donde se reportaron los montes submarinos que son utilizados en esta tesis. Durante la campaña del 2002, cuatro levantamientos independientes se llevaron a cabo en las ubicaciones reportadas por Moore

y Del Castillo [1974], de aquí en adelante estas ubicaciones son referidas como MS1, MS2, MS3 y MS4 (Figura 1).

Un inicial análisis de la existencia de estos posibles volcanes submarinos en el margen occidental del Golfo de México fue realizado solamente para el área del monte MS3 por Flores Capetillo, [2006], en consecuencia el análisis de esta tesis se extiende a examinar los datos de las tres restantes áreas de los montes submarinos MS1, MS2 y MS4 y su origen geológico. Para este análisis se utilizaron datos de batimetría que fueron registrados con un ecosonda monohaz y magnéticos provenientes de un magnetómetro marino de precesión-protón que fueron obtenidos entre el 11 y 24 de marzo de 2002. Con referencia al Puerto de Veracruz, el monte MS1 está ubicado a una distancia de 65 km al norte, el monte MS2 está a 37 km al noreste y el monte MS4 es el más alejado 66 km hacia el Este (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de los montes submarinos en el margen occidental del Golfo de México. Las posiciones de los montes reportados por Moore y Del Castillo [1974] están marcadas con tachuelas. La estación para el monitoreo temporal en Antón Lizardo está marcada hacia el Sur del puerto de Veracruz.

Los valores de profundidad adquiridos en la campaña fueron post-procesados para ser integrados en la elaboración de las cartas batimétricas que son utilizadas en el análisis de las formas del relieve submarino del talud continental frente a Veracruz, para evidenciar si hay estructuras asociadas a procesos magmáticos en el lecho marino del Golfo de México. Para visualizar estos resultados se integraron cartas de batimetría en 2D y modelos digitales de terreno que representaran el relieve del lecho marino en 3D.

Para la reducción de los datos marinos magnéticos a anomalías magnéticas, los valores magnéticos registrados a bordo del B/O JUSTO SIERRA fueron reducidos utilizando el campo geomagnético teórico de referencia, IGRF (International Geomagnetic Reference Field) de 2005, y corregidos por los efectos de la variación diurna en el campo geomagnético del área del levantamiento marino (utilizando datos registrados en la estación temporal ubicada en la Heroica Base Naval de Antón Lizardo que se encuentra a 25 km del puerto de Veracruz), y además por los efectos de magnetización inducida provocado por el rumbo de barco sobre el campo geomagnético medido. Para esta corrección por efecto de rumbo se utilizaron datos de una campaña posterior, SIGSBEE11 [Mortera et al., 2008], que se realizó en 2008, dado que durante el levantamiento de la campaña PMAG01 no se llevo a cabo el círculo de calibración para estimar la corrección por rumbo. Finalmente la anomalía magnética resultante se redujo aplicándole el campo magnético regional asociado al talud para obtener el residual de la anomalía magnética.

II. ANTECEDENTES

II.1. Ubicación del Levantamiento

El área de estudio de la campaña PMAG01 está ubicada al suroeste del Golfo de México, frente a la costa de Veracruz (Figura 2) dentro de una franja de aproximadamente 90 km paralela a la línea de costa a poco más de 40 km que cubre las ubicaciones de los montes submarinos (Tabla 1) propuestos por Moore y Del Castillo [1974].

Monte Submarino	Posición (Latitud, Longitud)
MS1	19.75° N, 96.04° W
MS2	19.34° N, 95.83° W
MS3	19.23° N, 95.76° W
MS4	19.10° N, 95.51° W

Tabla 1. Ubicaciones propuestas para los Montes Submarinos

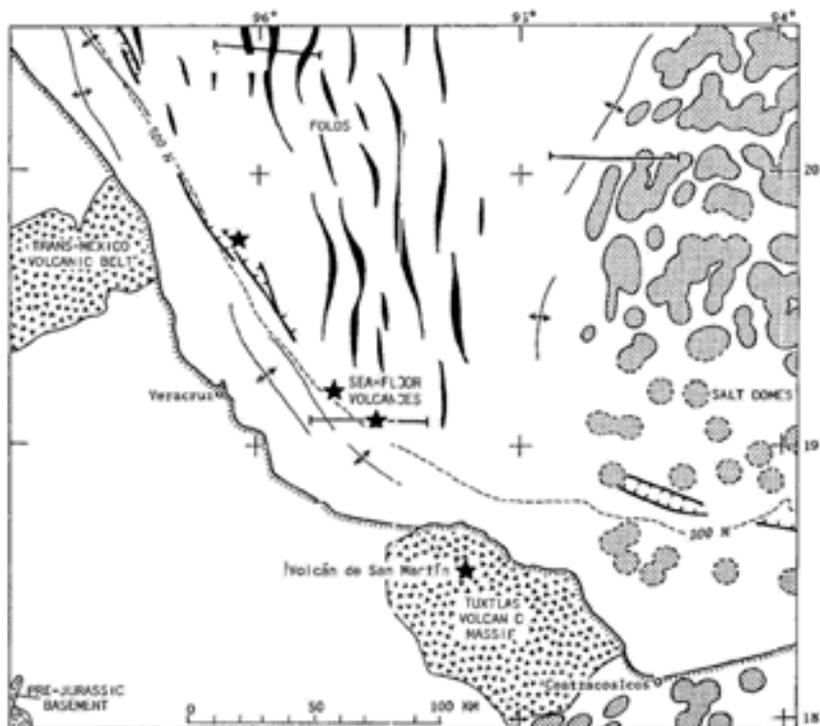


Figura 2. Ubicación del área de estudio (modificado de Moore and Del Castillo, 1974). La línea punteada (paralela a la línea de costa) marca el límite inferior de la plataforma continental frente al estado de Veracruz, México. En la parte continental destacan el macizo volcánico de los Tuxtlas y el Eje Neovolcánico Transversal Mexicano. En la parte marina resaltan, la provincia salina del Golfo en marcas grises y las dorsales mexicanas en el margen occidental del Golfo, éstas últimas son las formas curvadas con tendencia Norte – Sur.

II.2. Estudio Geofísico de 1971

Durante los meses de Mayo y Junio de 1971 se llevo a cabo un estudio conjunto de geofísica marina entre el Instituto de Geofísica de la UNAM y el Servicio Geológico de los Estado Unidos, teniendo como resultados anomalías magnéticas en el margen occidental del Golfo de México hasta de aproximadamente 75 nT [Moore et al., 1972]. Moore and Del Castillo [1974] observaron que estas anomalías eran similares en longitud de onda con aquellas encontradas en zonas de expansión de suelo oceánico (zonas de Rift); y ellos infirieron que las amplitudes pequeñas de estas anomalías podrían estar asociadas a fuentes de basalto que se encontrarían a profundidades de 10 km aproximadamente. Esta propuesta fue sustentada en parte, en el hecho de que estudios anteriores de sísmica de refracción en ésta región mostraron que la segunda capa de estratos (presumiblemente basaltos) se ubicaba aproximadamente a esa profundidad [Ewing et al., 1955]

El estudio marino de 1971 fue llevado a cabo en una amplia región del suroeste del Golfo de México (Figura 3), para tener una mejor comprensión del origen del Golfo de México y su subsecuente historia geológica. En particular esta región del golfo era favorable para dicho estudio, debido a que no se habían realizado exploraciones geofísicas tan extensivas como ésta, que se planeó con un espaciamiento entre transectos de 9 km en promedio; y con base en el hecho de que la angosta planicie costera adyacente al área de estudio probablemente había contribuido con muy poco sedimento que pudiera enmascarar las anomalías asociadas a las estructuras en las provincias del talud continental.

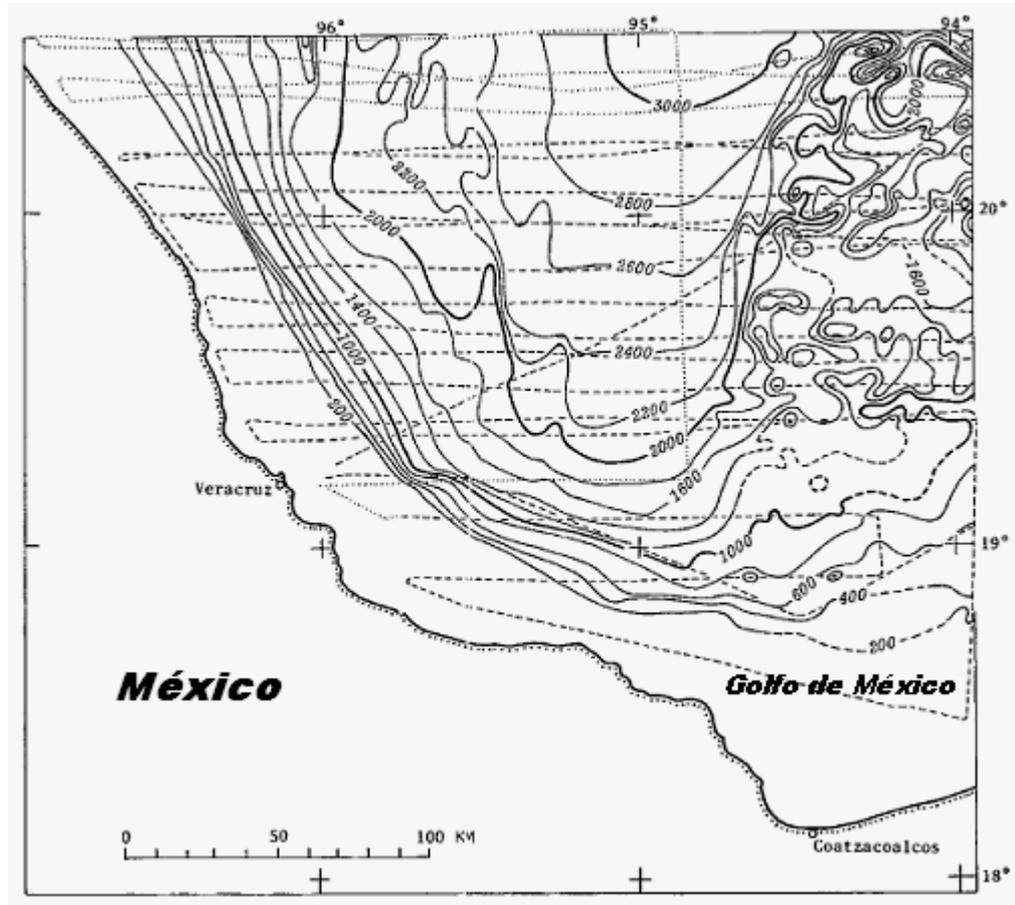


Figura 3. Campaña del B/O UnitedGeo. Las líneas punteadas marcan los transectos recorridos por el B/O UnitedGeo I sobre un mapa de batimetría (contornos de profundidad cada 200 m.). El registro magnético fue realizado a lo largo de estos transectos [Moore and Del Castillo, 1974].

En la parte norte del Golfo, Bayley y Muehlberger [1968] reportaron que las perforaciones más profundas en el talud continental de Luisiana, que se ubican a distancias de la costa mayores a 300 km, no habían alcanzado el basamento de los estratos sedimentarios. Contrario a estos grandes espesores de sedimento en esa parte del Golfo Viniegra y Castillo-Tejero [1970] reportaron que el basamento ocurre a una profundidad de solo 1,400 m cerca de la costa en los campos petroleros de la Faja de Oro, Veracruz.

El B/O UnitedGeo I recorrió 7,000 km de transectos en los que se registraron valores batimétricos, gravimétricos, magnetométricos y perfiles sísmicos del subsuelo marino. El buque utilizó el sistema de navegación satelital NAVSAT para registrar la posición del barco continuamente en sus trayectorias, este sistema también conocido como TRANSIT fue ampliamente utilizado hasta 1988 y completamente discontinuado cuando

hizo su aparición el sistema GPS en 1996. El sistema NAVSAT tenía un margen de error de 0.1 millas náuticas (185.2 metros). Lo que permitió tener un mayor control en el espaciamiento promedio entre líneas y las áreas que se incluyeron en el estudio como lo muestra la Figura 3. Este levantamiento fue planeado de tal forma que abarcara la provincia tectónica de interés en la parte suroeste del margen del golfo, que era la extensión mar adentro del cinturón mexicano de vulcanismo activo que se asociaba al complejo volcánico de los Tuxtlas en Veracruz y Tabasco, [Mooser, 1958].

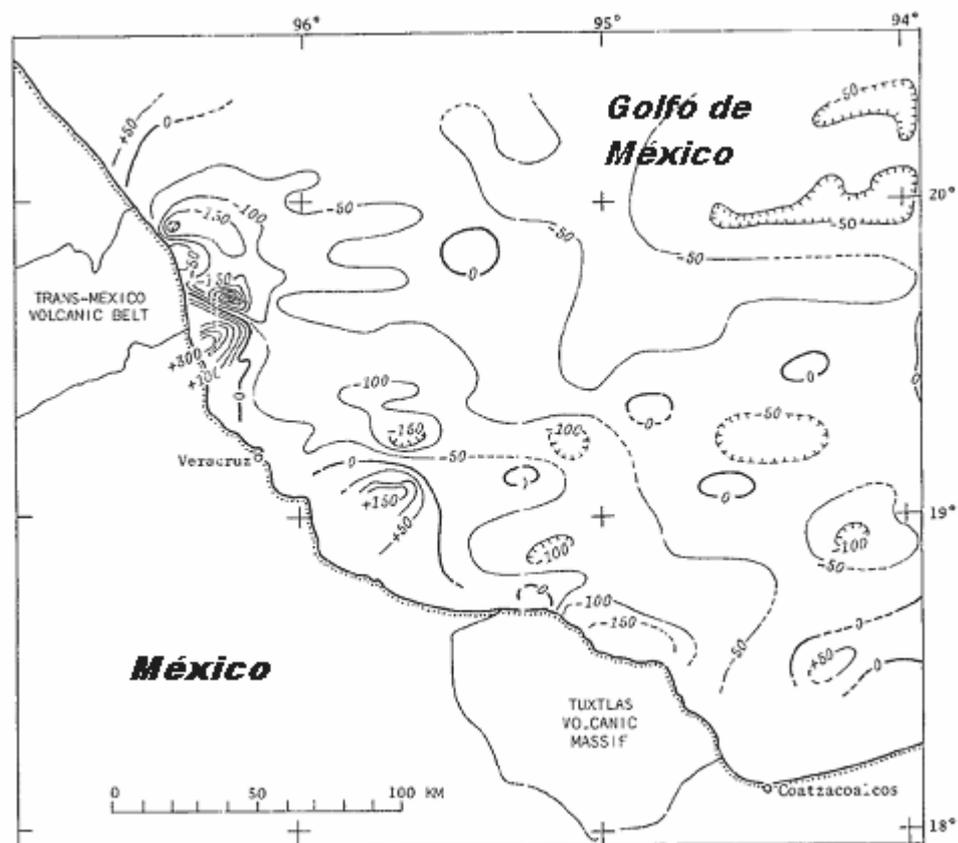


Figura 4. Mapa de Anomalía Magnética en el margen occidental del Golfo de México. Los contornos de la anomalía son resultado de los datos adquiridos en la campaña de 1971 de Moore y Del Castillo, [1974], a bordo del B/O UnitedGeo I. Los intervalos son cada 50 γ .

La Figura 4 muestra los contornos obtenidos en un mapa de anomalías magnéticas producto de los resultados obtenidos durante la campaña de Moore y Del Castillo [1974]. Los contornos en este mapa son una aproximación debido a que es una interpolación de

datos que estaban en líneas espaciadas 9 km en promedio entre si. Por lo que es claro que el mapa muestra una escala mayor y por lo cual excluye estructuras menores (entre transectos) que pudieran ser significativas para entender los procesos magmáticos en el margen continental del golfo.

Para Moore y Del Castillo, [1974], los datos de anomalía magnética presentaban una tendencia positiva conforme se aproximaban a la costa. Además los perfiles de refracción sísmica indicaban que en y entre el substrato del talud se apreciaban estructuras en formas de montículos, como se aprecia en los tres perfiles transversales al margen (Figura 5) que corresponden a las secciones sísmicas de los montes MS1 (perfil 34), MS2 (perfil 44) y MS4 (perfil 16).

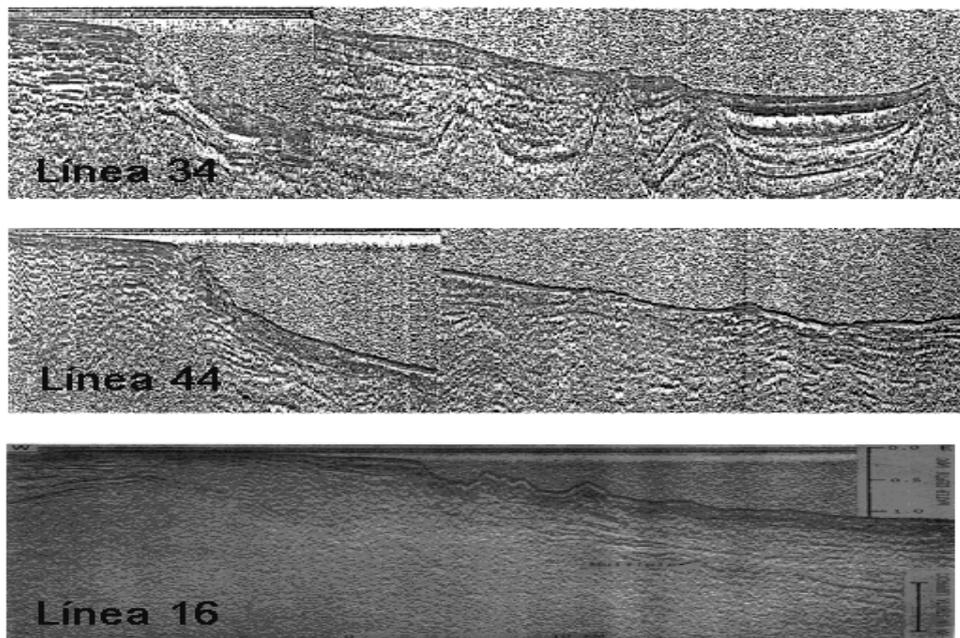


Figura 5. Perfiles sísmicos de la campaña de 1971, de Moore y Del Castillo [1974]. La reproducción de las secciones sísmicas es copia del reporte de Moore y Del Castillo [1972.]

II.3. Marco Geológico

II.3.1. Cuenca Sedimentaria del Golfo de México

La cuenca del Golfo de México tiene una forma aproximadamente circular de alrededor de 1500 km de diámetro. El Golfo de México está rodeado al Norte y al Oeste por una planicie costera baja que varía en anchura desde menos de 50 km en la parte centro-este de México hasta más de 550 km en la parte central de la planicie costera del Golfo de E.U.A. en los estados de Louisiana, Mississippi y Arkansas. Gran parte de la cuenca se encuentra en los estados sur de los E.U.A. y en los estados de Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila, México. La parte central es ocupada por la parte del Golfo de México que cubre un área de más de 1,500,000 km². En su parte más profunda, el substrato sedimentario de la cuenca tiene más de 10,000 m de espesor. Los estratos sedimentarios más profundos en la cuenca han sido identificados con edades del Triásico tardío. Su planicie abisal tiene profundidades hasta 3,750 m. Las profundidades del lecho marino del Golfo se reducen abruptamente hacia el este y el sur. Esta reducción abrupta se debe a los escarpes de Florida y de Campeche, conformando los límites de las plataformas de Florida y Yucatán. En direcciones hacia el Norte y Oeste, el piso del Golfo de México se eleva gradualmente hacia la costa con una suave pendiente, marcando los límites de las provincias fisiográficas de la plataforma continental. La batimetría del Golfo y los límites que enmarcan la cuenca del Golfo son ilustradas en la Figura 6. Mientras que la Figura 7 muestran las provincias y estructuras que se encuentran dentro de la cuenca de Golfo.

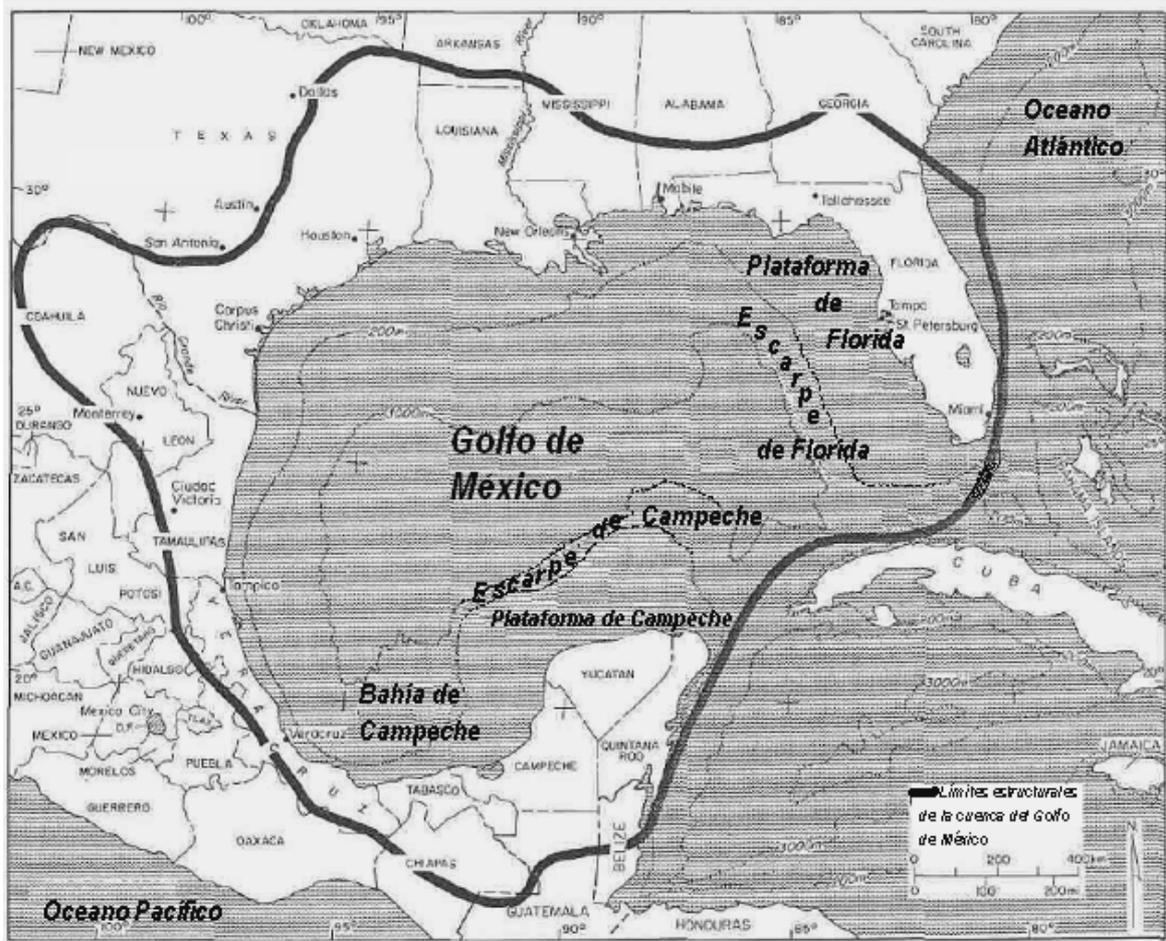


Figura 6. Provincias fisiográficas en el Golfo de México. La línea gruesa marca el límite de la cuenca del Golfo. Las mayores provincias en la cuenca son etiquetas como referencia. Modificado de Salvador A., [1991].

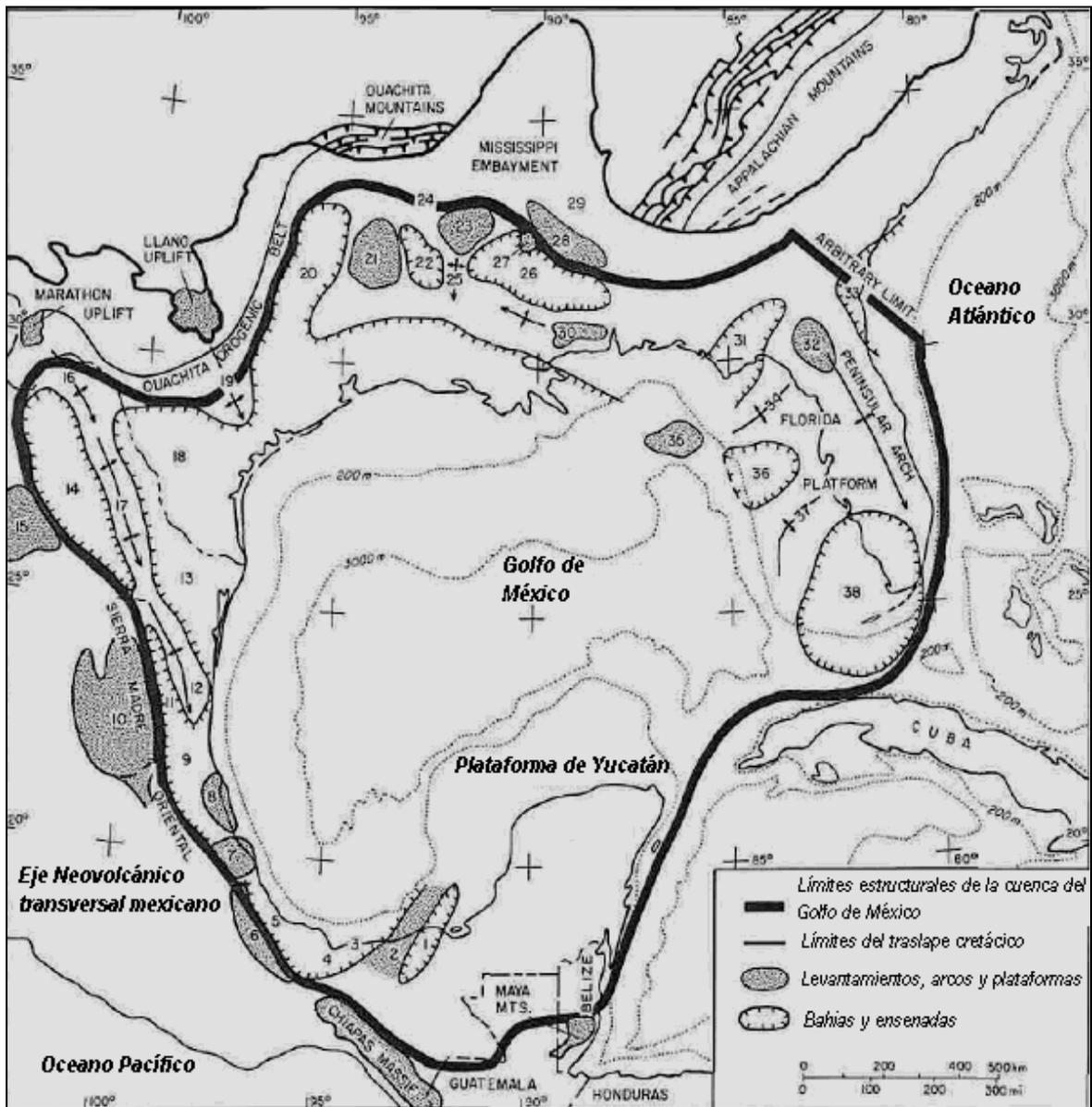


Figura 7. Esquema General de la Cuenca del Golfo de México. Características estructurales dentro de la Cuenca: 1, Cuenca de Macuspana; 2, Levantamiento de Villahermosa; 3, Cuenca de Comalcalco; 4, Cuenca Salina del Istmo; 5, Cuenca de Veracruz; 6, Plataforma de Córdoba; 7, Macizo Santa Ana; 8, Plataforma de Tuxpan; 9, Cuenca de Tampico-Misantla; 10, Plataforma de Valles-San Luis Potosí; 11, Cuenca de Magiscatzin; 12, Arco de Tamaulipas; 13, Cuenca de Burgos; 14, Cuenca de Sabinas; 15, Plataforma de Coahuila; 16, Levantamiento El Burro; 17, Arcos Peyotes-Picachos; 18, Ensenada Rio Grande; 19, Arco San Marcos; 20, Cuenca Este de Texas; 21, Levantamiento Sabine; 22, Cuenca salina del Norte de Louisiana; 23, Levantamiento Monroe; 24, Cuenca Desha; 25, Arco La Salle; 26, Cuenca salina del Mississippi; 27, Domo Jackson; 28, Cinturon Central Deformado del Mississippi; 29, Cuenca de Guerrero Negro; 30, Levantamiento Wiggins; 31, Ensenada Apalachicola; 32, Levantamiento Ocala; 33, Ensenada del sureste de Georgia; 34, Arco Middle Ground; 35, Plataforma Sureste; 36, Ensenada Tampa; 37, Arco Sarasota; 38, Cuenca del sur de Florida. Modificado de Salvador A., [1991].

II.3.2. Historia Geológica de la Cuenca del Golfo de México

Anterior al Triásico tardío se tiene poca evidencia de la geología de la cuenca del Golfo de México. Dado que las rocas de edad pre-triásica solo se conocen de algunos núcleos de pozos que se encuentran en áreas ampliamente separadas entre sí, por lo que gran parte de la historia geológica de la cuenca durante el Paleozoico es inferida de estudios de áreas vecinas. La actual cuenca del Golfo parece haber tenido su origen a finales del Triásico como resultado de un *rifting* entre la placa de Norteamérica, Sud-America y de África. El proceso de *rifting* probablemente continuo durante principios y mediados del Jurásico con la formación de corteza continental transicional a través de toda la parte central de la cuenca. Aparentemente el episodio principal tuvo lugar durante el Jurásico tardío, en el cual el bloque de Yucatán se trasladó hacia el sur y se separó de la placa de Norteamérica, formando corteza oceánica en la parte central de la cuenca y posteriormente formó los depósitos salinos. Avances intermitentes del mar dentro del área continental hacia el oeste, resultaron en la formación de los extensos depósitos salinos ampliamente conocidos hoy en día en lo que conforma los márgenes de la cuenca del Golfo.

A finales del Jurásico, la cuenca ha sido una provincia geológica estable, caracterizada por la persistente subsidencia de su parte central debido a su enfriamiento térmico y a la carga de sedimento. Al Este de la cuenca, la plataforma carbonatada de Florida estaba cubierta por un mar somero entre los finales del Jurásico al inicio del Cretácico. La plataforma de Yucatán emergió hacia mediados del Cretácico. Después ambas plataformas se sumergieron, la formación de carbonatos y evaporitas ha caracterizado la historia geológica de estas plataformas. La mayor parte del margen oriental de la cuenca del Golfo fue cercada por las plataformas carbonatadas desde principios del Cretácico. Mientras que su margen Oeste se vio afectado durante finales del

Cretácico y principios del Terciario por un episodio de deformación compresiva: la orogenia Laramide, que desarrolló la Sierra Madre Oriental del Este de México.

II.3.3. Fisiografía y Batimetría

El Golfo de México es una cuenca oceánica (1.5 millones de km²) semicerrada, la Placa 1 (Apéndice A) es una carta que muestra las mayores subprovincias fisiográficas y batimétricas. Las subprovincias desplegadas son similares a aquellas desplegadas por Martin y Bourma [1978] y su terminología ha sido continuada. En las porciones Norte, Sur y Este del Golfo, las plataformas continentales son muy anchas, por encima de 170 km. Mientras que en la porción Oeste en algunos lugares es menor de 13 km. La extensa planicie abisal de Sigsbee se ve modificada solamente por las intrusiones de diapiros salinos con forma de montes. La poco pronunciada pendiente de Texas y Louisiana, llena de pequeñas colinas y surcos esta en total contraste con los precipitados escarpes de Campeche y Florida. El valle erosional llamado Cañón DeSoto divide el terrígeno Golfo Oeste de la provincia Carbonatada de la plataforma de Florida, mientras que el cañón de Campeche divide la plataforma carbonatada de Yucatán de la región carbonatada y salina llamada los Knolls de Campeche. *El Talud Occidental de México*, consistente de largas estructuras con forma de crestas, atribuidas a procesos de movimiento de grandes masas se encuentra separada de la región de los Knolls de Campeche, un área de intensa actividad diapirítica, por una sección de bajo relieve llamada *Lengua de Veracruz*. Los típicos cañones submarinos de DeSoto y de Missisipi contrastan con los del Alaminos, Río Perdido y Keathley que se formaron y fueron deformados en parte, por la actividad diapirítica. *El Abanico del Missisipi*, la más grande característica estructural al interior de la cuenca, es de edad Plio-Pleistocénica y contrasta fuertemente con la mayor antigüedad de la misma. La fisiografía actual del Golfo de México, refleja los eventos que ocurrieron durante el surgimiento de la cuenca. Grandes cantidades de sedimento fueron depositados

y crearon una sustancial subsidencia en todas las áreas del Golfo enmascarando el Rift que dio origen a la cuenca capturando la sal ahora movilizada por los depósitos de sedimento dentro de la cuenca. En resumen la fisiografía del Golfo de México ha sido controlada por los siguientes procesos: 1) Rifting, 2) Subsidencia, 3) Desarrollo de plataforma carbonatada, 4) Cambios eustáticos en el nivel del Mar, 5) Diapirismo salino, 6) Deslizamientos por gravedad y 7) Grandes flujos por densidad (Turbiditas).

De particular interés para este trabajo es la descripción de las provincias *Talud Occidental de México* y la *Lengua de Veracruz*, puesto que la zona de estudio se encuentra entre el límite superior del *Talud Occidental de México* y el límite Norte – Oeste de la *Lengua de Veracruz*.

II.3.3.1. Talud Occidental de México

El Talud Occidental de México tiene una de las topografías más inusuales de todos los océanos del mundo. Al Norte el relieve presenta diapiros salinos que son la extensión hacia el Sur de los diapiros evaporíticos y los macizos de la plataforma continental Texas-Louisiana, también están presentes en la provincia del talud de Río Grande. Al Sur del Talud Occidental de México y extendiéndose hacia el Norte del levantamiento de los Tuxtlas esta la *Lengua de Veracruz*. El límite Oriental del Talud Occidental de México está flanqueado por la irregular topografía de los *Knolls de Campeche*. Entre la Lengua de Veracruz y la provincia del Talud de Río Grande están las *Crestas Mexicanas*.

Descritas por primera vez por Bryant et al. [1968], las crestas mexicanas consisten de una serie de crestas batimétricas alineadas formadas por pliegues anticlinales que tienen una disposición paralela a la costa. Las crestas forman un patrón regional constante con una longitud de onda aproximada de entre 10 y 12 km, y se extienden 500 km desde el Norte hasta el Sur incluyendo una porción enterrada. Tienen un relieve máximo de 500 m.

Son efectivas trampas de sedimentos, solo sedimentos pelágicos se encuentran en las primeras dos crestas más cercanas a la costa. Crestas individuales se extienden por grandes distancias. Bryant et al. [1968] trazó una cresta con una distancia de 96 km siguiendo la cresta. Ellos describieron 4 zonas dentro del complejo de crestas. La primera, asociada con las crestas salinas lineales del complejo del talud de Río Grande. La segunda, consistente de crestas con tendencia NNE-SSO que van desde los 22.33° hasta 24.5° N. La tercera, es un área dentro de un sistema de dos pliegues mayores que consideraron como una falla. Y la cuarta, que va de 20.5° a 22° N consiste de crestas arqueadas con tendencia SSE-NNO.

Estudios posteriores de reflexión sísmica [Pew, 1982] añadieron una quinta zona que consiste de crestas enterradas con tendencia SSE-NNO que van desde los 19° a 20° N. Muchos autores han sugerido diferentes teorías sobre el origen de las crestas mexicanas [Bryant et al., 1968; Garrison y Martin, 1973; Buffle et al., 1979; Pew, 1982]. Sin embargo ninguno de ellos sugiere alguna actividad volcánica en el área.

II.3.3.2. La Lengua de Veracruz

La provincia de la Lengua de Veracruz es la porción del Golfo de México que se encuentra entre el Talud Occidental de México y la provincia de los Knolls de Campeche. La porción suroeste de esta provincia cubre la parte enterrada más al sur de las crestas mexicanas. La plataforma continental adyacente a la Lengua de Veracruz es la mas angosta en el Golfo de México. El efecto de canalización de las estructuras diapiríticas en el Este y las crestas en el Oeste ha concentrado el aporte de sedimento del área de drenaje continental dentro de la depresión que comprende la Lengua de Veracruz.

II.3.4. Actividad Volcánica en el Área

Puesto que las principales características volcánicas en el área de estudio son de edad Cuaternaria, el enfoque de este subtema será centrado solamente en la Era Cenozoica. La mayor parte de la actividad del Cenozoico esta confinada a la porción Oeste de la cuenca del Golfo de México. Esta actividad magmática está probablemente relacionada con eventos de subducción durante esta era, de varias placas del Pacífico por debajo del margen Oeste de la Placa de Norteamérica. Un *hiatus* en vulcanismo asociado a subducción tiene lugar entre finales del Cretácico y principios del Terciario (entre 75 y 25 ma). Este evento posiblemente está relacionado con un cambio en la inclinación de la placa subducida por debajo de la Placa de Norteamérica [Engebretson et al., 1985]. Menor actividad volcánica relacionada con subducción tuvo lugar al interior del arco magmático. La mayoría de las rocas ígneas de este conjunto son ligeramente alcalinas, probablemente reflejando su petrogénesis proveniente de mayores profundidades que las rocas calcoalcalinas del Oeste. La reciente actividad del Volcán San Martín en la costa del Golfo pudiera indicar una relación con la existencia de volcanes submarinos reportados por Moore y Del Castillo [1974]. Dentro del contexto de actividad magmática, este estudio solamente hace referencia a las provincias volcánicas que pudieran tener relación con el vulcanismo adyacente a la zona. Siete centros volcánicos importantes yacen al interior o cerca de la planicie costera del Golfo hacia el sureste de la provincia volcánica Trans-Pecos. (Figura 8).

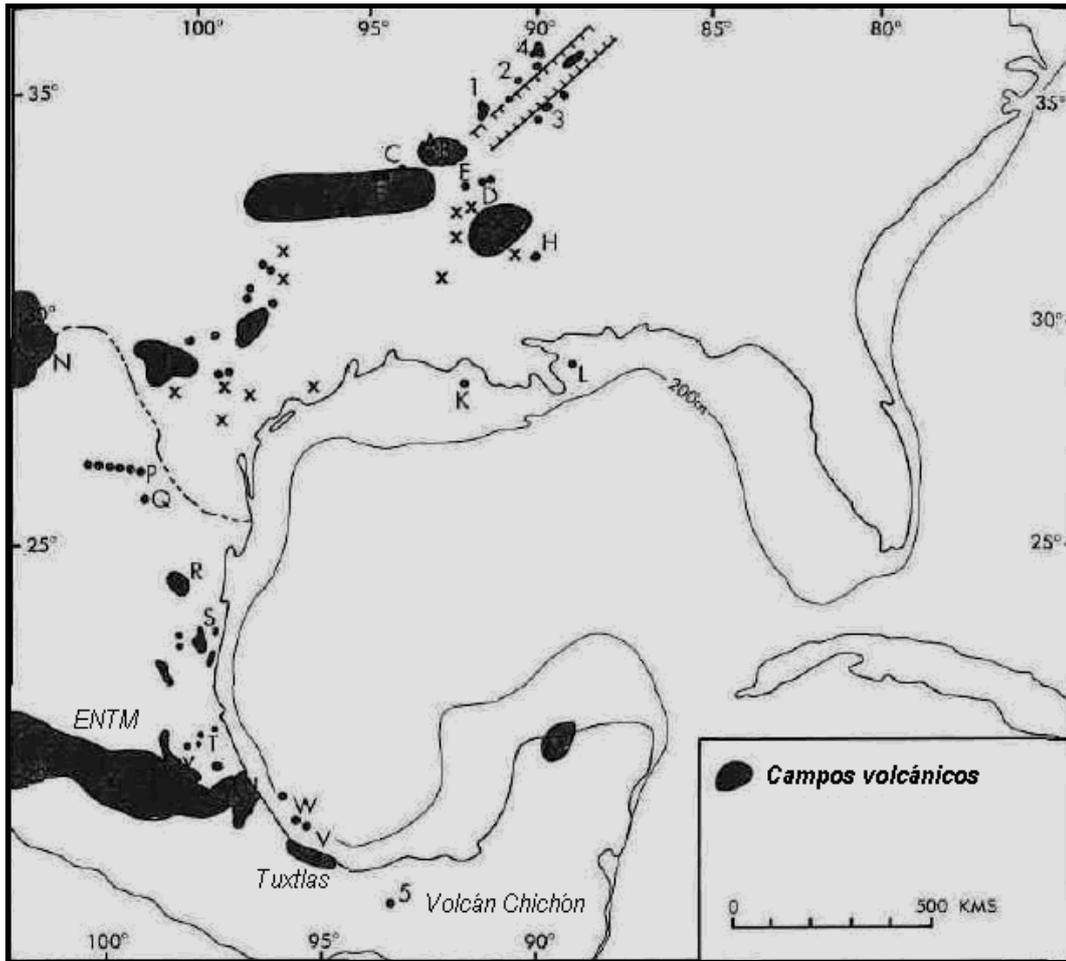


Figura 8. Distribución de los campos de rocas ígneas. Las ubicaciones de interés para este trabajo se describen individualmente. Los campos afines al área de estudio se marcan como: Provincia volcánica Trans-Pecos (N), Eje Neovolcánico Transversal Mexicano (Z, ENTM), montes submarinos en el talud continental (W), el macizo volcánico de los Tuxtlas (V), y el volcán Chichón en Chiapas (5).

La provincia que se ubica más al Norte en México es el *cinturón Candela-Monclova (P)*, con una orientación Este-Oeste a lo largo de 150 km (Figura 8). Intrusiones que van de Diorita a Sienita se llevaron a cabo entre finales del Eoceno y principios del Oligoceno. Esta actividad posiblemente ocurrió a lo largo de un sistema de fallas Triásicas reactivadas [Bloomfield y Cepeda-Davila, 1973; Lopez Ramos, 1981]. Al sureste se encuentra el *complejo alcalino Sierra de Picachos (Q)*. A 100 km al sureste se encuentra el *complejo alcalino San Carlos (R)*, se compone de numerosos intrusivos calco-alcalinos. El más extenso (cerca de 139 km²) también contiene abundantes diques y las relaciones transversales sugieren que cada unidad progresivamente más joven es más alcalina

también [Bloomfield y Cepeda-Davila, 1973]. Cuatro edades K-Ar fueron calculadas para este campo con un promedio de 28.8±0.6 ma (finales del Oligoceno).

El complejo alcalino de La Sierra de Tamaulipas (S), esta a unos 150 km al sureste y se compone de riolitas alcalinas a peralcalinas del Mioceno, usualmente compuesta de fenocristales de Sanidina, algunos Cuarzos y Acmita. Nefelina conteniendo Sienita que están compuestos de piroxenos sódicos y anfíboles. Pocos máficos volcánicos incluyendo Nefelinita, Bassanita, Basaltos alcalinos y Traqueo-Basaltos, son encontrados mas recientes (Cuaternario) [Robin y Tournon, 1978].

La planicie de la Huasteca (T), se encuentra a 200 km al sureste de Sierra de Tamaulipas, en esta planicie hay centros alcalinos que tienen edades de entre el Mioceno y el Plioceno [Robin y Tournon, 1978].

El Macizo de Santa Ana (U) se encuentra a 200 km al sureste de la Huasteca compuesta de basaltos alcalinos con edades entre Plioceno y Cuaternario. Traqueo-Basaltos marcan la terminación oriental del *Eje Neovolcánico Transversal Mexicano (Z)*, que es predominantemente calco-alcalino [Robin y Tournon, 1978].

El campo volcánico de los Tuxtlas (V), se encuentra a 200 km al sureste de la terminación del Eje Neovolcánico Transversal Mexicano, en la costa del Golfo de México. La actividad volcánica de este campo inicio a finales del Oligoceno y ha continuado hasta el presente [López Ramos, 1981]. La más reciente erupción del Volcán de San Martín fue en 1973 [Moore y Del Castillo 1974]. Dentro de este campo hay 3 centros volcánicos mayores y numerosos pequeños. Los más grandes, incluyendo el volcán San Martín, son volcanes de tipo escudo de baja elevación y de cerca de 10 km de diámetro con cráteres de 3.5 km de diámetro. La composición de los magmas pertenecientes a estos volcanes es predominantemente de Basaltos alcalinos a Hawaiitas, compuesto típicamente con fenocristales de Olivino-Clinopiroxenos y con escasa presencia de Plagioclasas.

Una aparente asociación independiente de rocas volcánicas yace a lo largo de la frontera entre el altiplano y la planicie costera. Esta zona está marcada por una serie de fallas normales que separan la corteza continental debajo del Altiplano de la corteza por debajo de la planicie costera que es corteza transicional, hacia aquella que se encuentra en la parte profunda de la cuenca del Golfo de México. Aquí los flujos de lava (en su mayoría basaltos de alcalinos a toleíticos, Hawaiitas y Mugearitas) tienen edades, para la zona Norte, de finales del Mioceno (7 a 8 ma). Mientras que para la zona central las edades van de 5 a 6 ma y para la zona Sur las edades varían entre 2 y 3 ma ubicándose en el Plioceno [Robin y Tournon, 1978].

III. METODOLOGÍA Y DATOS

La campaña oceanográfica PMAG01 se llevó a cabo a bordo del B/O JUSTO SIERRA de la Universidad Nacional Autónoma de México (Figura 9). Esta embarcación está dedicada a la de investigación científica en los sectores mexicanos del Golfo de México y Mar Caribe. A bordo se cuenta con un sistema de navegación GPS, este sistema tiene una precisión de posicionamiento de hasta 3 m. Este sistema es utilizado para el posicionamiento geográfico de los registros obtenidos por el ecosondeo batimétrico y el levantamiento magnético durante la campaña PMAG01 del 2002.



Figura 9. Buque Oceanográfico *Justo Sierra de la UNAM*. Las dimensiones del buque son 50 m de eslora, 10.3 m de manga y 4.7 m de calado.

La campaña oceanográfica PMAG01 tuvo como objetivo principal realizar un levantamiento geofísico de batimetría y magnetometría en la parte superior del Talud continental del Golfo de México, frente a las costas centrales del Estado de Veracruz (Figura 10). Ambos levantamientos se llevaron a cabo en cuatro áreas específicas en las que se había reportado la existencia de estructuras parecidas a volcanes submarinos en el

talud. Estas cuatro áreas se encuentran entre las latitudes 19° N y 19.8° N y longitudes 95.50° W y 96.1° W. Las coordenadas de las cuatro áreas con la posición de su respectivo monte submarino están enlistadas en la Tabla 2.

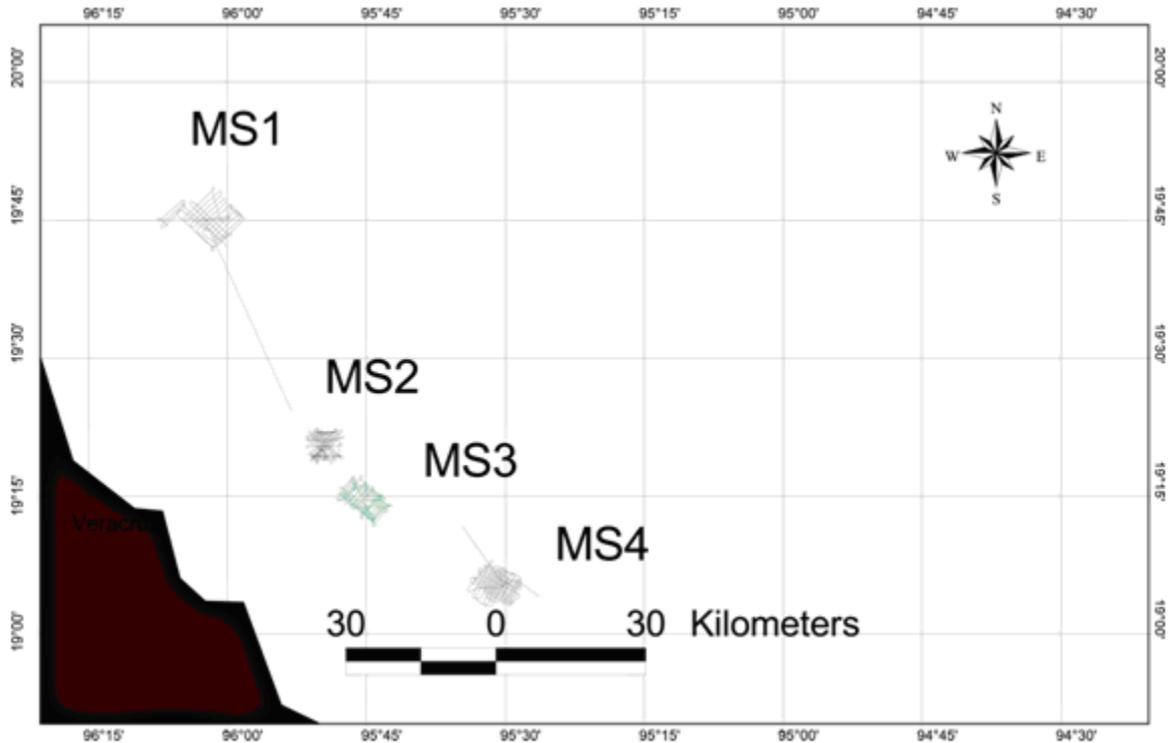


Figura 10. Áreas en que se llevó a cabo el estudio geofísico, campaña PMAG01.

Área	Ubicación del área		Ubicación del Monte Submarino		Profundidad (metros)
	Latitudes (N)	Longitudes (W)	Latitud (N)	Longitud (W)	
MS1	19,70 - 19,80	95,96 - 96,13	19,75	96,04	800
MS2	19,30 - 19,37	95,78 - 95,86	19,34	95,83	600
MS3	19,19 - 19,29	95,69 - 95,80	19,23	95,76	-----
MS4	19,04 - 19,13	95,46 - 95,57	19,1	95,51	600

Tabla 2. Ubicaciones de las áreas de estudio, campaña PMAG01.

III.1. Levantamiento de Batimetría

Los sistemas de ecosondeo se usan para investigar indirectamente el lecho marino de los océanos y las estructuras que están en el substrato marino. A través del tiempo se han venido mejorando los sistemas de ecosondeo en cuanto a su resolución espacial y tiempo de muestreo, mejorándose también por el uso del sistema de navegación GPS que le da mayor precisión al posicionamiento de los valores que se registran permitiendo tener una mejor imagen del relieve submarino durante las exploraciones. Muchos sistemas de ecosondeo modernos, tienen la funcionalidad del registro digital en tiempo real y el procesado secuencial de datos instantes después de que son adquiridos.

Desde la década de los 50s y hasta la fecha, el sistema más común para medir profundidades en los mares es la ecosonda de un solo haz (ecosonda monohaz). En la actualidad este sistema se compone de tres partes fundamentales: una consola de control digital (actualmente una estación de trabajo o PC), un transmisor-receptor (referido como *transceiver*) y un transductor de una frecuencia específica para el rango de profundidades a medir. La consola de control es la que programa los parámetros para emitir, sincronizar y registrar los sondeos generados por el transductor. El *transceiver* tiene la funcionalidad de ser generar y modular una señal eléctrica para que el transductor convierta la señal eléctrica en un pulso de sonido y lo emita a través del medio acuoso. A su vez el transductor funciona como receptor, convirtiendo el regreso de sonido a una señal eléctrica y pasándola al *transceiver*, donde se emplea un circuito eléctrico para digitalizar la señal y enviarla a la consola para capturar el registro digital y para su despliegue gráfico casi en tiempo real.

Para la campaña oceanográfica PMAG01 se utilizó un ecosonda EA400 de la marca Simrad-Kongsberg que se ilustra en la Figura 11. Este ecosonda opera con una gama de frecuencias entre los 38 kHz y los 710 kHz. Para PMAG01 un transductor de 38

kHz fue utilizado y los registros de profundidades fueron convertidos utilizando un valor promedio de 1,500 m/s para la velocidad de propagación del sonido a través del agua.

La consola de la ecosonda EA400 utiliza una interfaz gráfica basada en el sistema operativo Windows que permite llevar control en tiempo real de los registros de profundidades y automáticamente captura los datos de profundidad y su correspondiente posición. Los archivos de datos capturados son de dos tipos: los que corresponden a los datos procesados con valores digitales y los que corresponde a los datos binarios sin procesar (datos.RAW). Los datos.RAW pueden ser posteriormente procesados en la oficina, utilizando la función de “REPLAY” del programa operativo de la EA400, cuya finalidad es procesar de nuevo los datos en caso de que el algoritmo de detección haya fallado en reconocer el pulso correspondiente al rebote de la onda acústica contra la superficie del lecho marino.



Figura 11. Esquema de la ecosonda EA400 de Simrad-Kongsberg. (1) Interfaz Gráfica, (2) Unidad de procesamiento, (3) Generador y receptor de señal o GPT (General Purpose Transceiver), y (4) Transductores

III.1.1. Datos de Batimetría

Durante la campaña PMAG01 se recolectaron 21,662 datos de profundidad. De estos, 7,646 corresponden a tránsitos y al área MS3 que fue procesado por Flores Capetillo [2006]. El resto de los datos (14,016 valores de profundidad) corresponden a las áreas MS1, MS2 y MS4. Solamente 12,847 valores son utilizados en este estudio (Tabla 3). Los datos eliminados correspondieron a los valores que en su mayoría estaban por debajo de los 1,200 m de profundidad, el cual se observó como el límite aceptable para la calidad de la señal. También se eliminaron datos aleatorios que estaban fuera de rango de la tendencia en la batimetría registrada. Del total de datos adquiridos solo se eliminó el 9% en las áreas de interés.

Monte Submarino	Datos Adquiridos	Datos Utilizados
MS1	5398	4314
MS2	4950	4866
MS4	3668	3667

Tabla 3. Distribución y relación de datos adquiridos-procesados.

La distribución de las mediciones registradas de las tres áreas son mostradas en la Figura 12. Las trayectorias de estas mediciones, para el área del monte MS1 presentan un distribución diferente a las otras áreas, debido a que fueron adquiridas en dos periodos, uno al principio de la primera etapa de la campaña en la que se estaba localizando el sitio donde el lecho marino presentara una estructura elevada correspondiente a un monte submarino, mientras que el levantamiento del segundo periodo se realizó al final de la primera etapa.

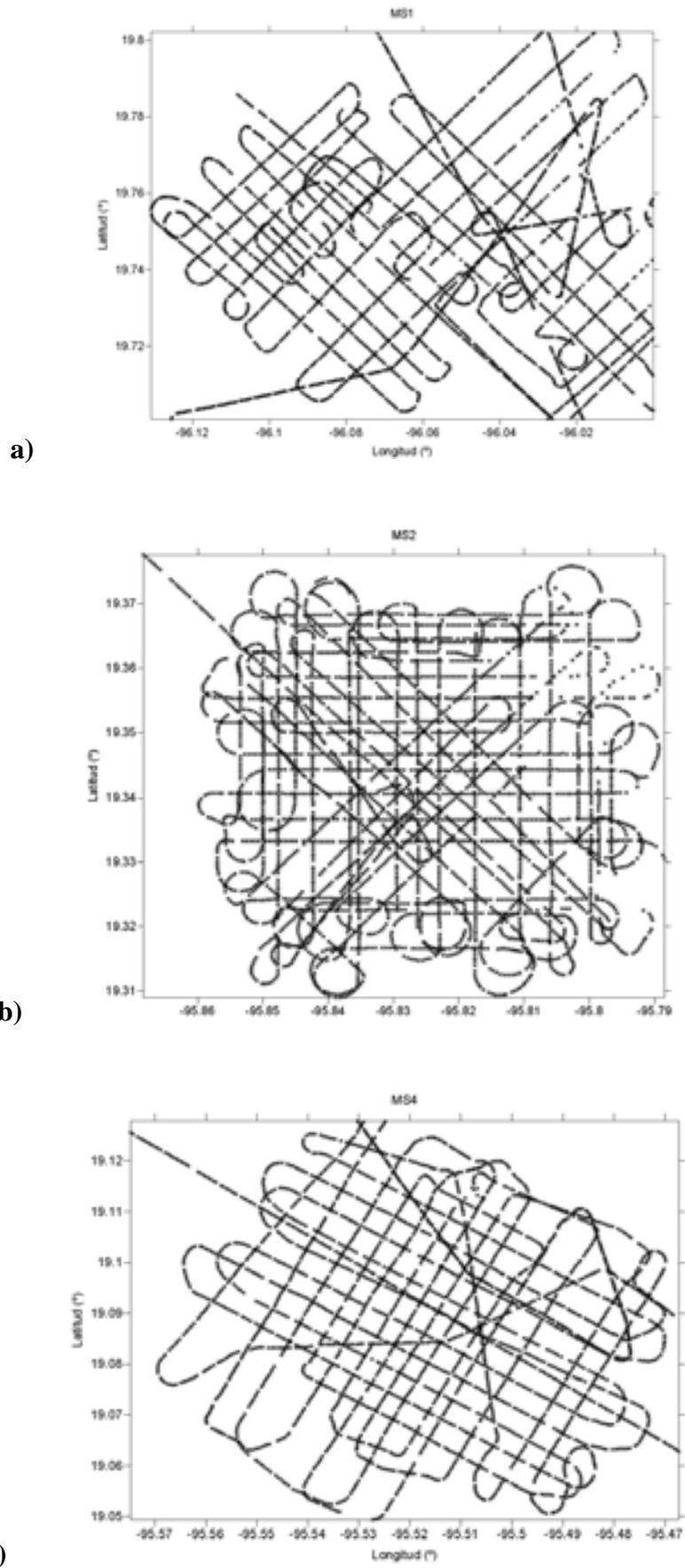


Figura 12. Trayectorias de los levantamientos para definir la batimetría. a) MS1, b) MS2 y c) MS4.

III.2. Magnetometría

El campo magnético en un punto de la tierra se puede descomponer en 7 componentes. Estas son la declinación (D), inclinación (I), intensidad horizontal (H), intensidad vertical (Z), campo total (F) y las componentes norte (X) y este (Y) de la intensidad horizontal. Por convención la declinación se considera positiva cuando se mide al este del norte. La inclinación (I) y la intensidad (H) se consideran positivas hacia abajo, X positiva cuando va al norte y Y positiva cuando va al este como se ilustra en la Figura 13.

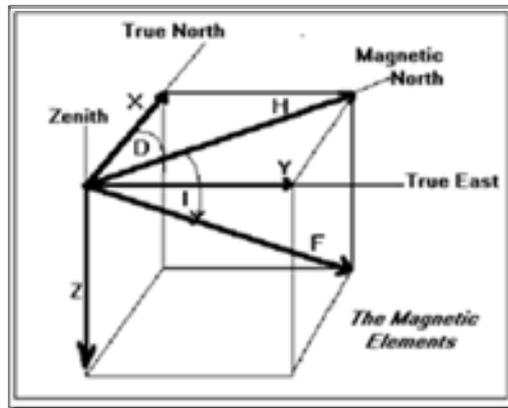


Figura 13. Componentes del campo geomagnético terrestre.

El campo geomagnético medido en cualquier punto de la superficie terrestre es una combinación de varios campos generados por diferentes fuentes. Estos campos están sobrepuestos e interactúan entre sí. Más del 90% del campo medido es generado por el núcleo externo en el interior de la tierra. Generalmente se hace referencia a esta porción de campo geomagnético como el campo dipolar o principal. Este campo varía ligeramente en grandes periodos de tiempo (de miles a millones de años) y puede ser calculado para un punto específico en la Tierra por la fórmula internacional del campo geomagnético de referencia (IGRF). Otras fuentes magnéticas contribuyen variaciones en periodos de menor tiempo que afectan las direcciones y magnitudes del campo principal.

Para la campaña oceanográfica PMAG01 se utilizaron dos magnetómetros de precesión-protón para registrar la magnitud del campo total en la zona de estudio; en la base temporal de tierra se utilizó un magnetómetro ENVIMAG de Scintrex y en el mar un magnetómetro marino G877 de Geometrics. Los sensores de los magnetómetros de *precesión-protón* están diseñados de tal manera que un contenedor no magnético lleno de un líquido (usualmente agua o algún hidrocarburo como el queroseno) debe contener una bobina de alambre sumergida en el líquido. Los protones libres dentro del fluido tienen pequeños campos magnéticos, de ahí que se alinearán por si mismos con las líneas de flujo del campo magnético de la Tierra. Sin embargo, tan pronto como se aplique una corriente a la bobina que polarizará el fluido dentro del sensor, los protones se alinearán con el campo electromagnético de la bobina energizada. Cuando se deja de aplicar corriente a la bobina, los protones tenderán a “alejarse” de su alineamiento con el campo electromagnético de la bobina para alinearse nuevamente con el campo magnético de la Tierra, al tener giro (espín) los protones no se alinean inmediatamente con el campo presente sino que tardan en hacerlo y mientras esto pasa los protones presentan precesión, este fenómeno se ilustra en la Figura 14.

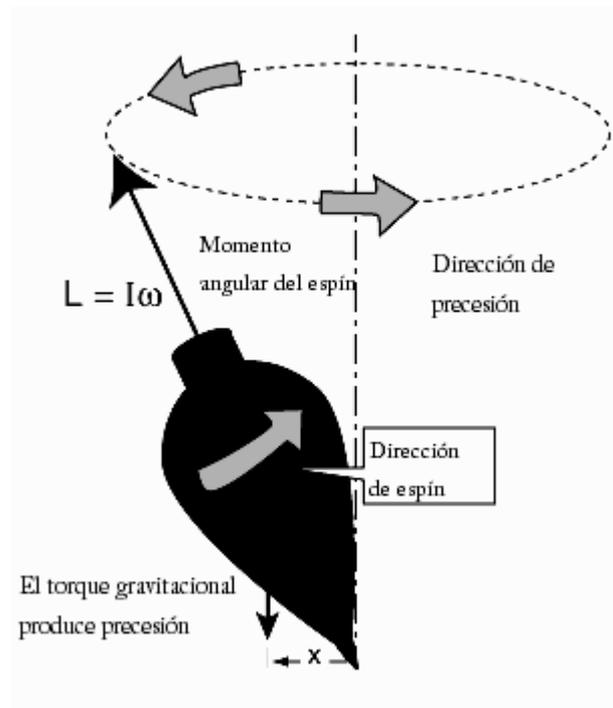


Figura 14. Un trompo al girar presenta tanto espín como precesión.

Mientras se da este efecto de precesión, los protones se comportan como pequeños magnetos dentro del fluido provocando que se induzca una pequeña corriente alterna (AC) a la bobina. La señal de esta corriente es detectada y amplificada y su frecuencia es contada para obtener una medición repetible y muy precisa de la intensidad total del campo magnético en el sensor. La frecuencia de la señal medida es proporcional al valor absoluto del campo magnético de la Tierra en el ambiente. Entonces, un magnetómetro de precesión de protones obtiene el valor absoluto del campo magnético de la Tierra midiendo la frecuencia de la precesión de los protones y convirtiendo esa frecuencia en unidades usadas para representar cuantitativamente el campo magnético de la Tierra $|F|$ en gammas $[\gamma]$ o nanoTeslas $[nT]$.

III.2.1. Base Magnética en Tierra

La estación temporal magnética fija en tierra (que se uso como referencia para el estudio marino para monitorear las variaciones diurnas del campo geomagnético frente a la costa central del Estado de Veracruz) fue posicionada en la Heroica Escuela Naval Militar en la punta de Antón Lizardo, aproximadamente a 25 km del Puerto de Veracruz. El magnetómetro ENVIMAG Scintrex de precesión-protón se utilizó por siete días para la adquisición de los datos magnéticos en esta localidad. Esta estación requirió de la instalación de un panel solar para funcionar las 24 horas para evitar el ruido que generaría una toma de corriente eléctrica. Este sitio fue monitoreado magnéticamente anteriormente a la instalación de este magnetómetro para ver si cumplía con las condiciones requeridas para el establecimiento de una base temporal magnética en tierra: (1) que la estación base se encuentre en zonas de bajo gradiente geomagnético (<4.5 nT/m), (2) que estén ubicadas a no más de 160 km del área de estudio (a 66 km esta el área MS4 que es la más alejada), y (3) que estén alejadas a mas de 60 m de construcciones y objetos que puedan generar perturbaciones magnéticas [Breiner, 1973]. La Figura 15 ilustra la posición de la base magnética en tierra con respecto de las cuatro áreas en el mar, en la proyección se observa la escala que muestra que la base se encontraba alejada de cualquier construcción.

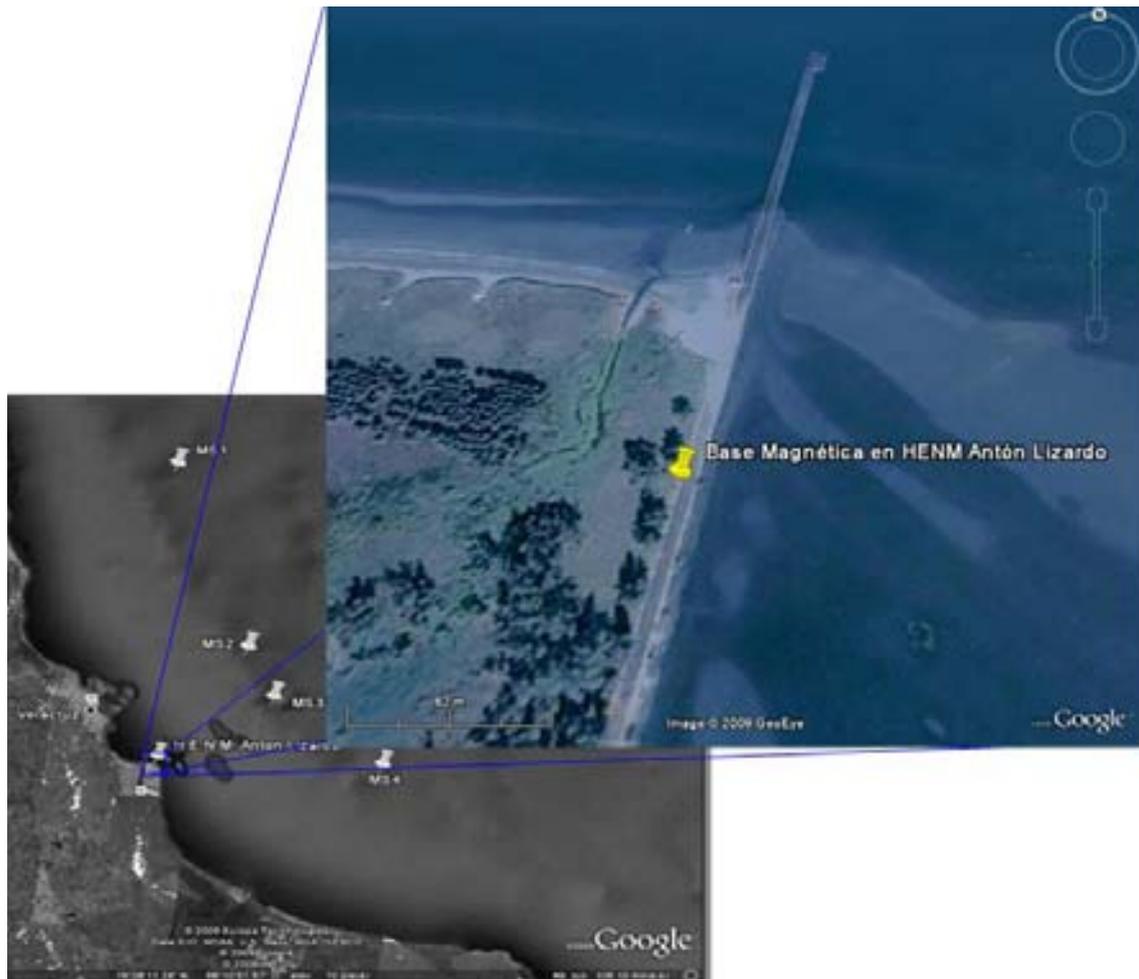


Figura 15. Ubicación con respecto a la base magnética de los montes submarinos. El recuadro superior es una magnificación de la Punta de Antón Lizardo, Veracruz. En el recuadro se muestra que la base de registro estaba suficientemente alejada de cualquier construcción.

La adquisición de los datos en la estación Anton Lizardo comenzó a las 00:00 GMT del 12 de Marzo del 2002 y terminó a las 23:59 GMT del 18 de Marzo del 2002, cubriendo un periodo de 7 días entre los días julianos 71 y 77, con una posición fija a 19.0621° N y 95.9828° E obtenida con un GPS-12 portátil de la marca Garmin. El registro se llevó a cabo con un intervalo de muestreo de 1 minuto, mismo que se remuestreó posteriormente durante el procesamiento para obtener una serie de tiempo con un intervalo de 1 segundo. Hay que mencionar que durante la adquisición de los datos en la base en tierra se presentaron algunos malfuncionamientos del equipo, por lo que se dejó de registrar en algunos periodos cortos de tiempo, produciendo pérdida de datos que

posteriormente fueron reconstruidos utilizando los registros del observatorio Geomagnético de Teoloyucan, Estado de México.

III.2.2. Datos Magnéticos Marinos

Con el B/O Justo Sierra se llevo a cabo el levantamiento marino magnético conjuntamente con el levantamiento de batimetría, para este levantamiento magnético se utilizó un magnetómetro marino de precesión de protones de la marca Geometrics modelo G-877. Que al igual que el magnetómetro ENVIMAG de Scintrex tiene una resolución de 0.1 [nT]. El sensor fue remolcado a 250 m detrás del Buque, una distancia 5 veces mayor del largo de la eslora del B/O JUSTO SIERRA (su eslora es de 50 m) para reducir el campo magnético que induce el buque sobre el magnetómetro [G-877 Manual, 2001]. Las dimensiones de la configuración del magnetómetro remolcado se muestran en la Figura 16.

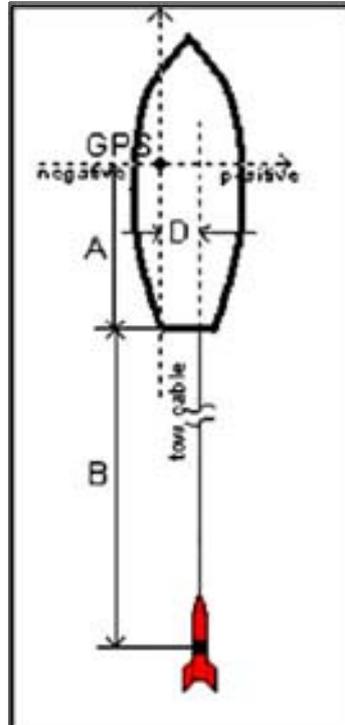


Figura 16. Ubicación de los elementos principales para el arreglo del magnetómetro marino G-877; A = 34.8 m., B = 250 m., D= 1.23 m.

Los elementos principales para el arreglo G-877 – Buque, son las posiciones y distancias con respecto a la antena del GPS, la armazón (*fish*, en rojo) en el que va montado el sensor del magnetómetro marino G-877, la longitud del cable que comunica al *fish* con la interfase de la fuente de energía (caja de conexiones y fuente) y la computadora que funciona como consola de operación. El registro del campo magnético se realizó utilizando el software MagLog de Geometrics, que a la vez controla los parámetros de operación del magnetómetro. Para comunicar la computadora con el sensor del magnetómetro se utilizó la caja de conexiones y fuente (Figura 17). En este dispositivo se conecta la toma de corriente (DC power input), el cable que viene del *fish* (Mag cable), y el cable de comunicación serial a la entrada RS-232 para conectar la computadora. El registro magnético fue continuo con un periodo de muestreo de 1 s y se realizó sobre las mismas trayectorias del levantamiento batimétrico (Figura 12)

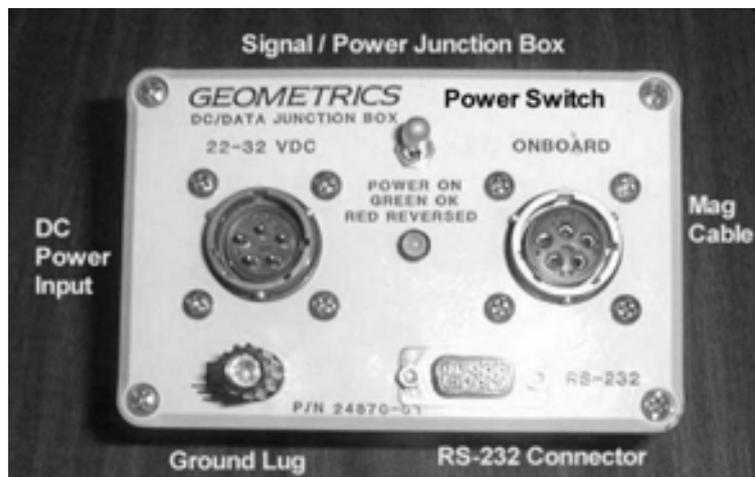


Figura 17. Caja de conexiones del G-877.

III.2.3. Procesamiento de los Datos Magnéticos

La magnitud del campo total $|F|$ medido por los magnetómetros indiscriminadamente registra los efectos del campo magnético de la Tierra, más aquellos provocados por diversas estructuras magnéticas locales y las variaciones diurnas. Con la finalidad de poder hacer una interpretación de las estructuras magnéticas, los datos magnéticos registrados son reducidos sustrayendo los valores correspondientes a los efectos de las variaciones temporales y los valores teóricos correspondientes al IGRF de la época en que se hizo el levantamiento. Este remanente sería el valor de la anomalía magnética que se integraría a un mapa de anomalías magnéticas que estarían asociadas a estructuras geológicas en el lugar del estudio.

Para obtener los valores de las anomalías magnéticas es necesario hacer una breve descripción teórica de los cálculos que se realizaron para estimar:

- a) Los valores teóricos usando la fórmula IGRF,
- b) Los valores por el efecto de variación diurna,
- c) La corrección por rumbo (Heading) para los datos marinos y
- d) La sustracción del campo regional.

El IGRF es una serie matemática del campo principal de la Tierra y del cambio anual (variación secular). En regiones de la superficie terrestre, el campo principal (con fuentes provenientes solamente del interior de la Tierra) es el gradiente negativo de un escalar potencial V que puede ser representado por una serie de expansión truncada:

$$V(r, \theta, \lambda, t) = R \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \operatorname{sen} m\lambda) P_n^m(\theta)$$

Donde r , θ y λ son coordenadas geocéntricas (r es la distancia desde el centro de la Tierra, θ es la colatitud, y λ es la longitud), R es una constante del radio de referencia

(6371.2 km); $g(t)$ y $h(t)$ son coeficientes en el tiempo t , $P_n^m(\theta)$ son los términos de los armónicos de Schmidt semi-normalizados en la colatitud θ ; y expandiéndose en grado n y orden m . Los coeficientes del campo principal son funciones del tiempo y para el IGRF el cambio se asume lineal en un intervalo de 5 años, por lo que el IGRF se modela cada 5 años y para la época siguiente, la tasa de cambio está dada por coeficientes predictivos de la variación secular [Chapman and Bartels, 1940; Langel, 1987]. Para el cálculo del campo principal en este estudio se utilizó la fórmula IGRF 2005 que se encuentra disponible en el sitio de Internet del Centro Nacional de Datos Geofísicos (*NGDC, National Geophysical Data Center*) perteneciente a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration*) de los Estados Unidos. Los cálculos se realizaron con un programa en FORTRAN con coeficientes para la época actual (Apéndice B).

Las correcciones por variación diurna en exploraciones magnéticas están determinadas por la necesidad de separar las variaciones temporales del campo magnético terrestre del campo principal. Chapman and Bartels, [1940] establecen que la mayor parte de las variaciones diarias del campo magnético terrestre se deben a los efectos directos del Sol en la Ionósfera terrestre, por lo que éste efecto de variación diurna depende directamente de la hora local. Existen otras variaciones temporales como las tormentas magnéticas pero estas tienen un origen distinto relacionado directamente con la actividad solar por lo que son independientes de la posición relativa de la Tierra con el Sol y sus efectos se considera que afectan a la superficie terrestre casi en su totalidad y a la vez sus efectos son distribuidos no uniformemente. Por lo que cuando se presenta este fenómeno en el registro continuo de campo magnético no pueden ser removidos sus efectos y los valores magnéticos medidos en el mar durante estas tormentas no son confiables para ser usados en un levantamiento. En cambio existen diferentes métodos para remover el efecto

por variación diurna en el registro magnético. En algunos estudios [i. e. Riddihough, 1976] se ha comprobado que una buena estimación resulta de establecer una línea base en los días de menor perturbación y con base en ello se procede a calcular las diferencias (que posteriormente serán aplicadas como correcciones) entre el registro de base magnética y la línea base correspondiente a los días de menor perturbación. Este procedimiento fue aplicado a los datos adquiridos en la estación base de Anton Lizardo para la campaña PMAG01.

La corrección por rumbo (*heading*) de un barco es necesaria en exploraciones marinas pues se sabe que la estructura de la embarcación y sus maquinas pudiera producir una magnetización local que se divide en dos partes; una magnetización inducida que depende linealmente de las componentes del campo y una magnetización permanente que es independiente de esas componentes [Bullard and Mason, 1961]. El efecto total del barco se compone de: una componente independiente del rumbo magnético y de componentes proporcionales al seno y al coseno del rumbo y a dos veces el rumbo.

El método propuesto por Bullard and Mason [1961] determina que el campo medido por un magnetómetro arrastrado detrás de la popa de un barco puede ser expresado como:

$$F_Q = F + C_0 + C_1 \cos \theta + C_2 \cos 2\theta + S_1 \sin \theta + S_2 \sin 2\theta$$

Donde F_Q es el valor observado, F es el valor del campo teórico principal (IGRF), θ es el rumbo del barco, y los coeficientes C_0 , C_1 , C_2 , S_1 y S_2 son constantes que dependen de las propiedades magnéticas del barco, del valor magnético local y de la posición del punto Q relativa al barco [Whitmarsh and Jones, 1969].

Buchanan et al. [1996] establece que el efecto por el rumbo de un barco puede ser calculado realizando un ajuste de mínimos cuadrados usando la forma de la ecuación dada

por Bullard and Mason [1961]. En este ajuste, el campo principal es la constante C_0 y se considera que los términos con senos son despreciables pues dependen de la geometría del barco y este se considera geométrico desde la posición del magnetómetro, siendo los términos de senos menores que la décima parte de los términos de cosenos. Por esto es que el ajuste por rumbo se realiza usando únicamente las constantes C_0 , C_1 y C_2 , dicho ajuste queda expresado de la siguiente forma:

$$\Delta Fm_{\text{rumbo}}(\theta) = C_0 + C_1 \cos \theta + C_2 \cos 2\theta$$

Donde ΔFm_{rumbo} es la cuantificación de la corrección en función del rumbo θ . Esta corrección tiene que ser calculada realizando un levantamiento marino en forma de un círculo (círculo de calibración) que es un transecto circular no muy grande que tiene que llevarse a cabo en zonas batimétricamente planas y libres de anomalías magnéticas relevantes [e. g. Whitmarsh and Jones, 1969; Buchanan et al., 1996].

Debido a que para la campaña PMAG01 no se realizó el levantamiento circular, se estimaron los valores para estos efectos por rumbo mediante el uso de los datos magnéticos registrados en las vueltas realizadas por el buque entre cada línea del levantamiento. Pero estos datos arrojaron resultados muy variables por lo que se prefirió utilizar un círculo de calibración que se realizó en una campaña posterior (SIGSBEE11 [Mortera et al., 2008]), asumiendo que la mayor contribución a este efecto está dada por la magnetización permanente del buque (B/O Justo Sierra), se consideró que si bien no es el ajuste ideal es una aproximación aceptable.

Este círculo de calibración fue reducido aplicando el IGRF y por el efecto de variación diurna. Debido a que la campaña SIGSBEE11 se llevó a cabo dentro del polígono internacional oriental que define los límites de las zonas económicas exclusivas de México, Estados Unidos y Cuba en el Golfo de México y no habiendo la posibilidad de

establecer una base magnética para el registro de las variaciones diurnas cercana a la zona de estudio, se utilizó una técnica de ajuste a una curva de variación diurna conocida, basándose en las diferencias del valor observado de campo total en los cruces de líneas durante una misma campaña [Buchanan et al., 1996].

Como último se procedió a sustraer el campo regional producido por la forma del talud con la finalidad de obtener el residual de la anomalía local. Esto se llevo a cabo utilizando las herramientas de procesado del programa SURFER de *Golden Software*. Este programa calcula una superficie que representa el efecto regional y aritméticamente sustrae los valores dados por esta superficie de la anomalía resultante.

IV. RESULTADOS

IV.1. Batimetría

La mayoría de los datos batimétricos registrados durante la campaña PMAG01 fueron utilizados. En los resultados solo se incluyen los valores para el mapa del relieve submarino correspondiente a la parte superior (< 1,200 m de profundidad) del Talud Continental Occidental del Golfo de México frente a Veracruz y colindando al Sur con la zona de la Lengua de Veracruz, teniendo un descenso suave de la pendiente y no habiendo saltos abruptos en el relieve. La batimetría muestra en las tres áreas que enmarcan las localidades de los tres montes submarinos, MS1, MS2 y MS4 que está conformada por varios cañones submarinos, como se observa en las Figuras 18, 19, y 20, respectivamente. En las tres áreas, las lecturas de profundidades mayores a 1,200 m se consideraron no confiables, por lo que el graficado del relieve por debajo de esta profundidad resulta un efecto del procesado. Los niveles de contorno en las cartas están a cada 100 m. Después de la interpolación para obtener la graticula, las zonas sin datos fueron recortadas para evitar interpretaciones donde no hay información. La escala de colores en las figuras es relativa a los mínimos y máximos registrados en cada una de las áreas. Para el área MS1, el color azul es de mayor profundidad, alcanzando una profundidad de hasta 1,000 m, mientras que las profundidades para MS2 y MS4 (en azul también) llegan a los 900 m. Las ubicaciones propuestas de los tres montes submarinos que hace mención el estudio de Moore y Del Castillo [1974] están posicionadas con una cruz roja dentro de las tres figuras para su referencia. En las tres áreas, las líneas de los perfiles sísmicos (Figura 5) del estudio de 1971 están marcadas con líneas en dirección Este-Oeste o viceversa en el relieve mostrado en las Figuras 18, 19 y 20.

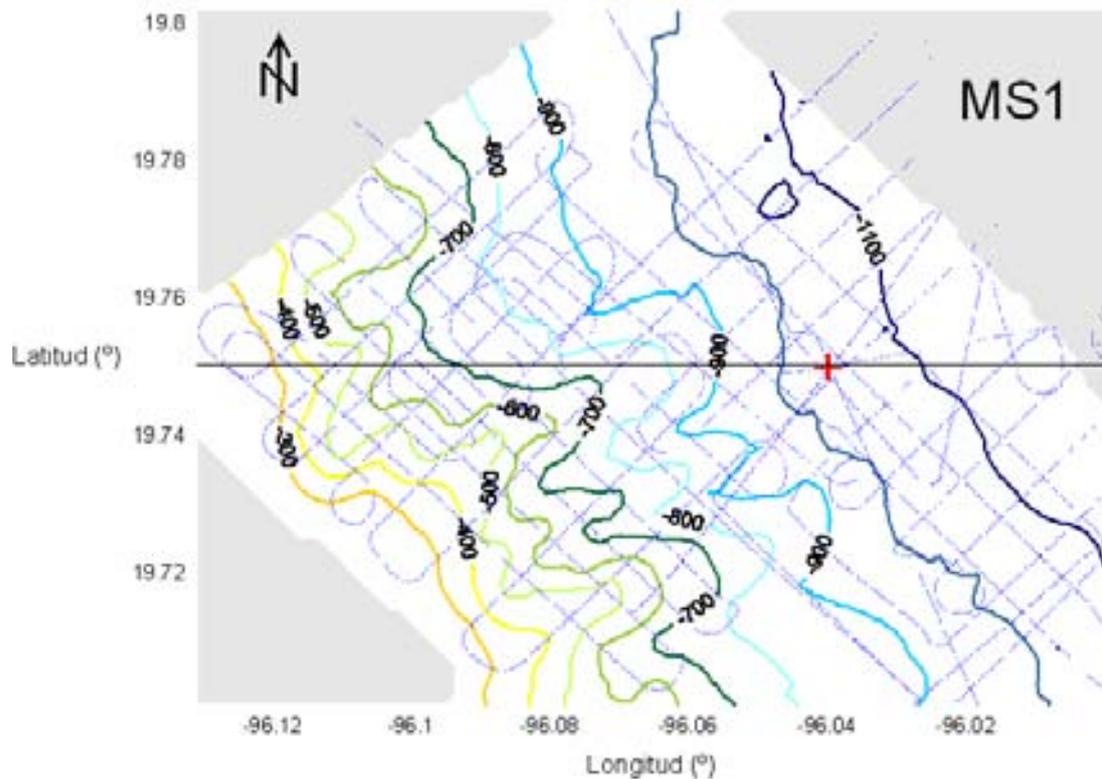
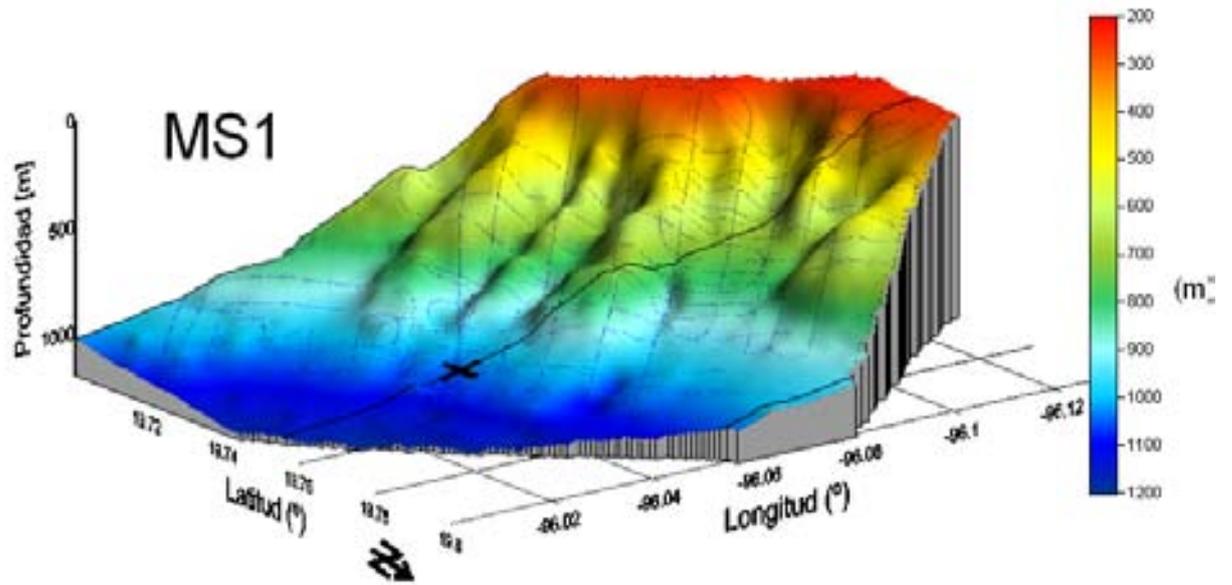


Figura 18. Relieve batimétrico del área MS1. El panel superior muestra el relieve en una escala de colores, siendo los rojos para los mínimos valores de profundidades y los azules para los máximos valores las líneas punteadas en azul representan los transectos para la campaña PMAG01. En el panel inferior, las curvas de nivel en la carta están en intervalos de 100 m. La línea horizontal en negro marca el perfil sísmico34 hecho a bordo del UNITEDGEO1 y el símbolo + en rojo marca la localidad reportada del monte submarino MS1.

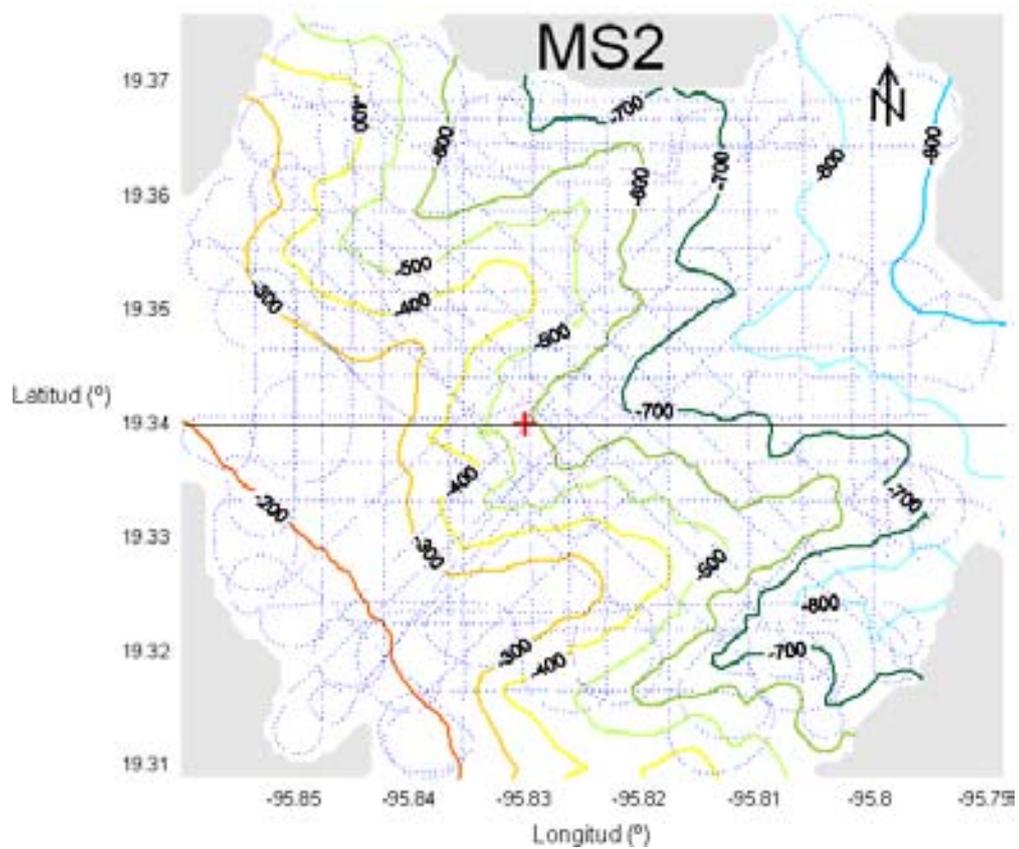
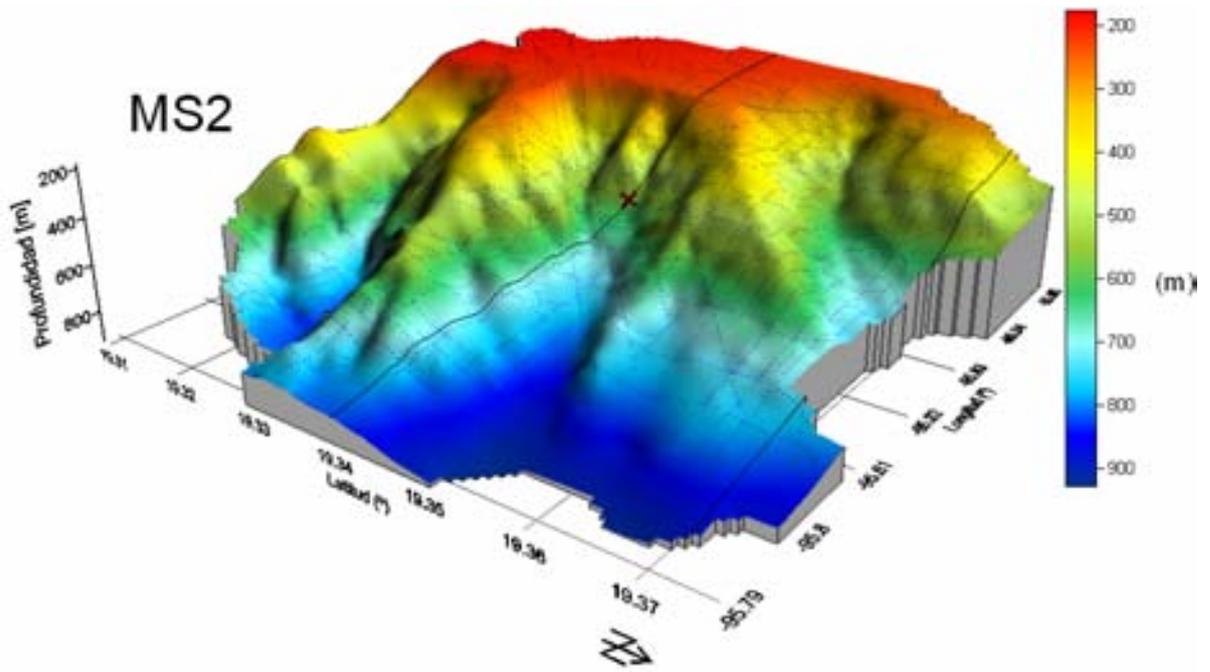


Figura 19. Relieve batimétrico del área MS2. La línea horizontal en negro marca el perfil sísmico 44 hecho a bordo del UNITEDGEO I. El símbolo + marca la localidad reportada del monte MS2. La escala de colores y los intervalos de contornos son explicados en la Figura 18.

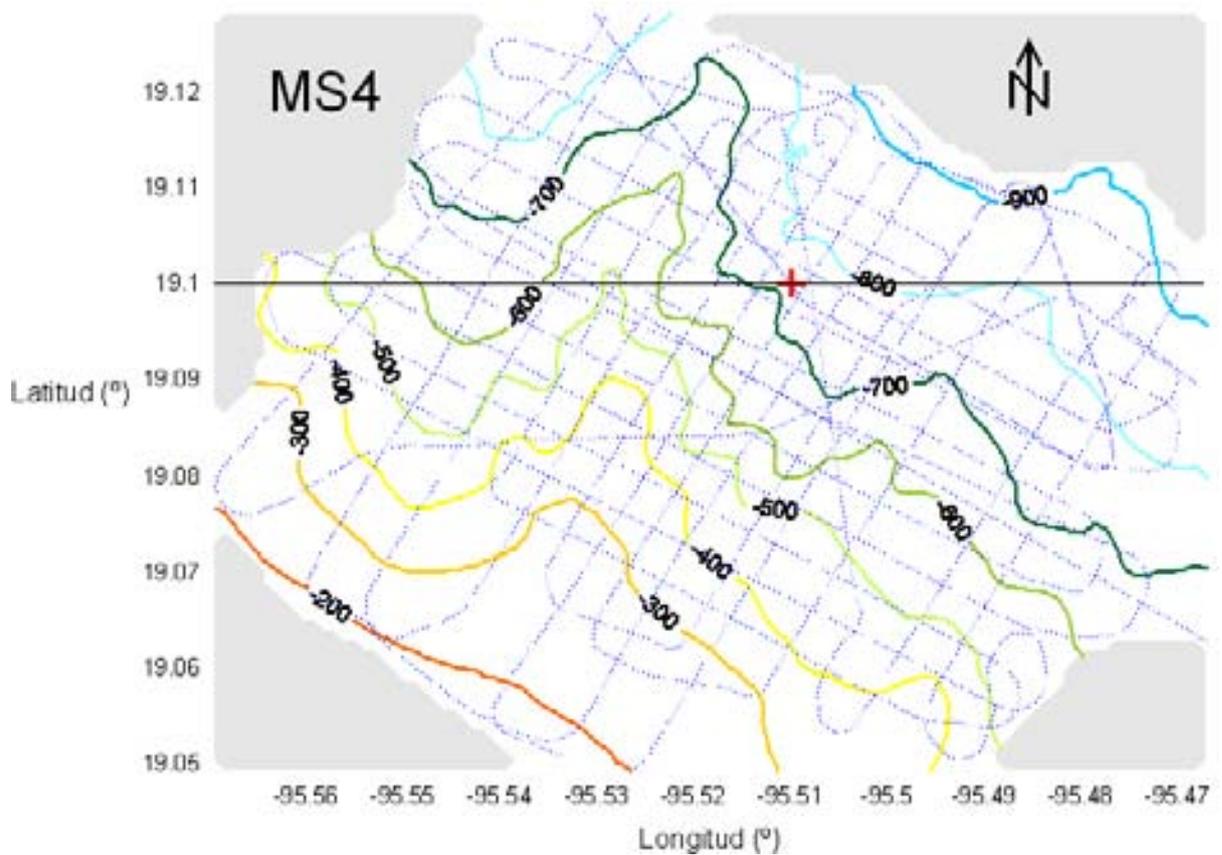
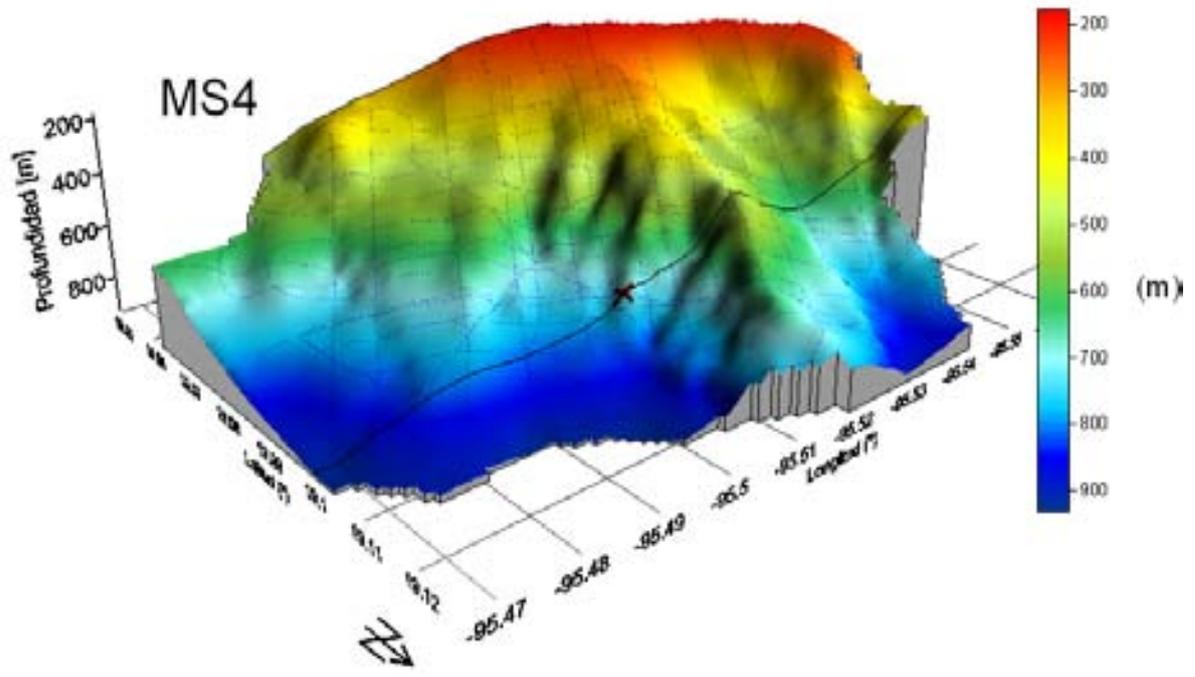


Figura 20. Relieve batimétrico del área MS4. La línea horizontal en negro marca el perfil sísmico 16 hecho a bordo del UNITEDGEO I. El símbolo + marca la localidad reportada del monte MS4. La escala de colores y los intervalos de contornos son explicados en la Figura 18.

IV.2 Magnetometría

IV.2.1. Base Magnética en Tierra

En tierra se llevo a cabo un registro continuo del campo geomagnético en una estación temporal dentro de las instalaciones de la Escuela Naval en la punta de Antón Lizardo, Veracruz, México. Este registro magnético fue reducido de la siguiente manera, primero se realizó un remuestreo a un menor intervalo utilizando un código en MATLAB (Apéndice C), ya que originalmente se registraron los datos a un intervalo de muestreo de 1 minuto en tierra, mientras que en el buque se muestreo a cada segundo. Posteriormente a la serie de valores registrados en la estación se le restaron los valores calculados con el IGRF de su correspondiente minuto (utilizando el programa del Apéndice B), sin embargo debido a las posibles diferencias entre los valores mínimos para cada 24 horas, se utilizó la diferencia correspondiente entre el valor registrado y el valor dado del IGRF para normalizar la serie a un mínimo común (Figura 21).

Posteriormente se procedió a examinar el índice DST Ecuatorial durante el periodo de registro en la estación (entre los días julianos 72 y 77) para evitar que se utilizara la línea base en los días que presentaran una mayor perturbación durante el monitoreo. La Figura 22 muestra en el registro que los días 74 al 77 tuvieron una mayor perturbación por lo que la línea base fue establecida dentro de los días julianos 72 al 73.

Serie corregida para el dia juliano 70

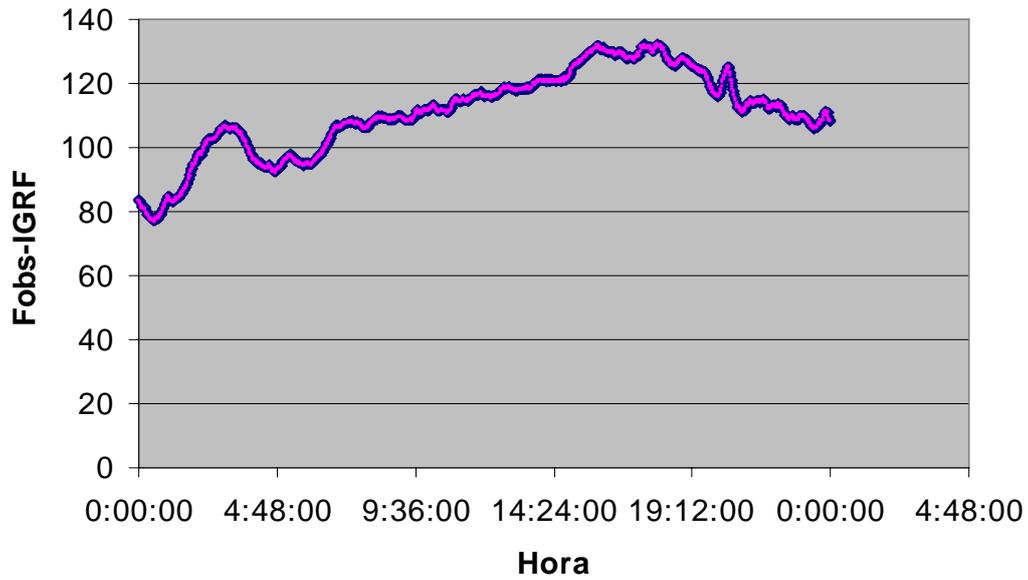


Figura 21. Restar el valor del IGRF a los datos de la base magnética. En la imagen se muestra el resultado de restar a la serie un valor constante en la línea rosa y en la línea azul el resultado de quitar el IGRF usando el programa del apéndice B para cada 24 horas.

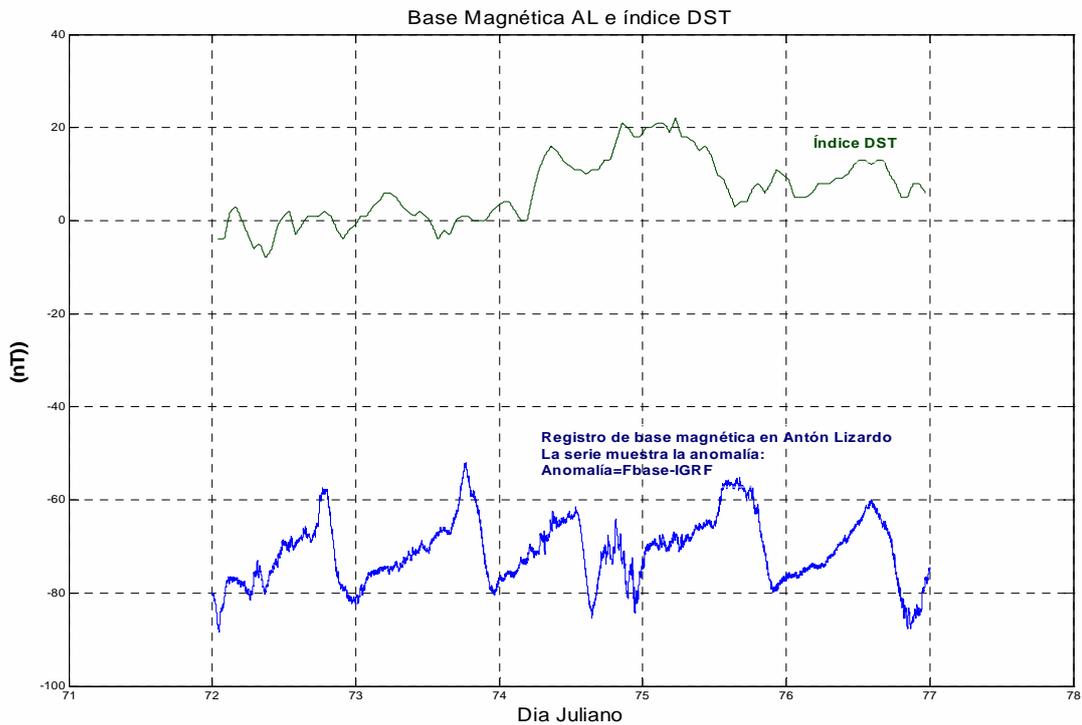


Figura 22. Base magnética AL e índice DST para los días julianos 72 al 77: Datos originales de base – IGRF (serie azul), Índice DST Ecuatorial (serie verde).

IV.2.2. Datos Magnéticos Marinos

Los datos magnéticos marinos fueron adquiridos en las mismas trayectorias que los datos de batimetría. Los valores magnéticos registrados en las vueltas no son utilizados para el cálculo de las anomalías, debido a que el magnetómetro se aproximaba al buque durante estos giros por lo que el sensor del magnetómetro era afectado fuertemente por la magnetización inducida del buque. Las Figuras 18, 19 y 20 muestran transectos con diferente configuración en la prospección de cada área. Para las áreas MS1 y MS4, los transectos tienen dos principales direcciones, NO-SE, NE-SO y en sentido inverso. Mientras que para el área MS2, los transectos tienen cuatro direcciones en N-S, E-O, NO-SE, NE-SO y en sentido contrario. Para cada área, los transectos fueron agrupados en las direcciones principales, ya que las anomalías presentaban diferentes efectos para cada grupo de direcciones principales. En el caso de calcular la anomalía con todos los grupos de transectos, el conjunto de datos muestran una gran discrepancia entre sus cruces y encubriendo con mucho ruido los lineamientos de anomalía.

Los datos magnéticos registrados se redujeron con el siguiente procedimiento; primero se hizo la reducción del campo teórico, IGRF-2005 [Langel, 1991], usando el programa en FORTRAN que se incluye en Apéndice B. Después los valores son reducidos por el efecto de la variación diurna, utilizando las variaciones registradas en la estación de Antón Lizardo. Posteriormente los valores fueron reducidos por el efecto de rumbo del buque que influye en el campo geomagnético. Como no se realizó un círculo de calibración para calcular los efectos por rumbo en el registro magnético de PMAG01, se tuvo que recurrir a los datos de otra campaña (SIGSBEE11) que se llevó a cabo a bordo en el B/O JUSTO SIERRA en Junio del 2008. Para obtener los datos de dicho círculo, se planteó un transecto circular como el de la Figura 23, con un radio de 1 mn. A estos datos

se les realizó igualmente la reducción por IGRF y por variación diurna para obtener los valores correspondientes a cada rumbo que serian utilizados para la corrección de rumbo.

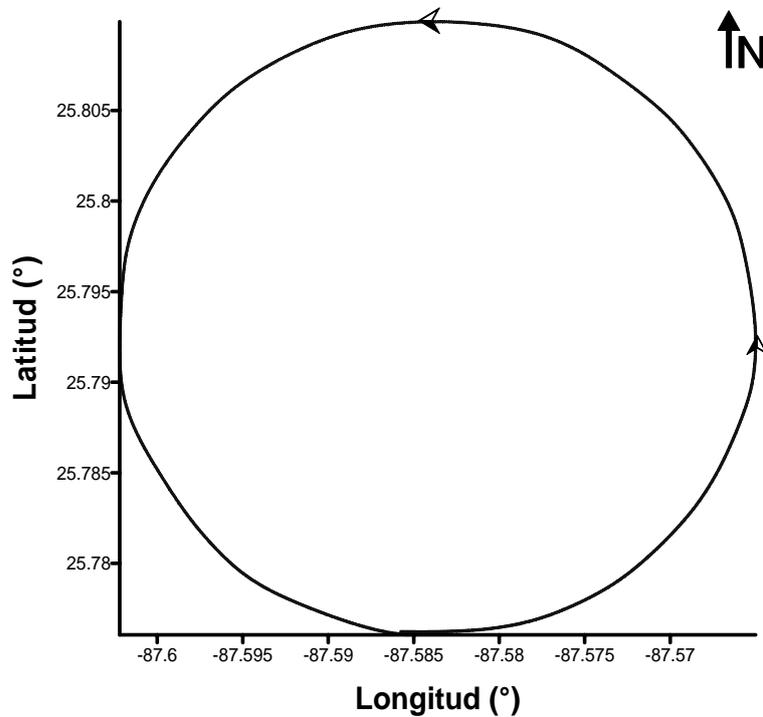
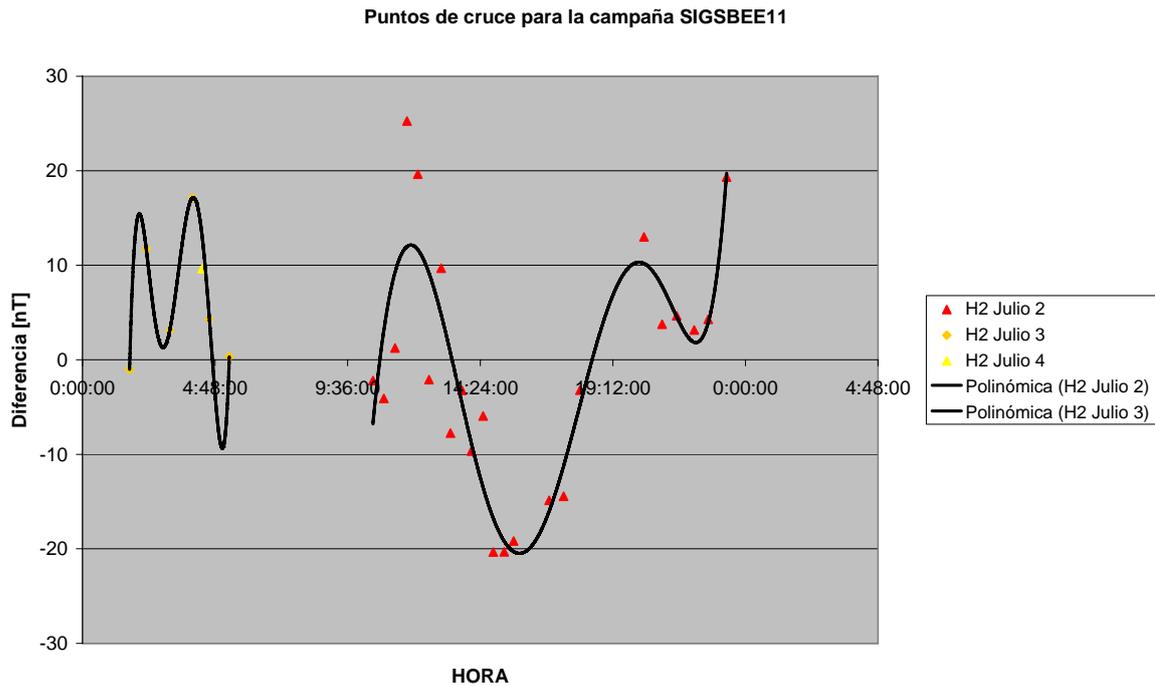


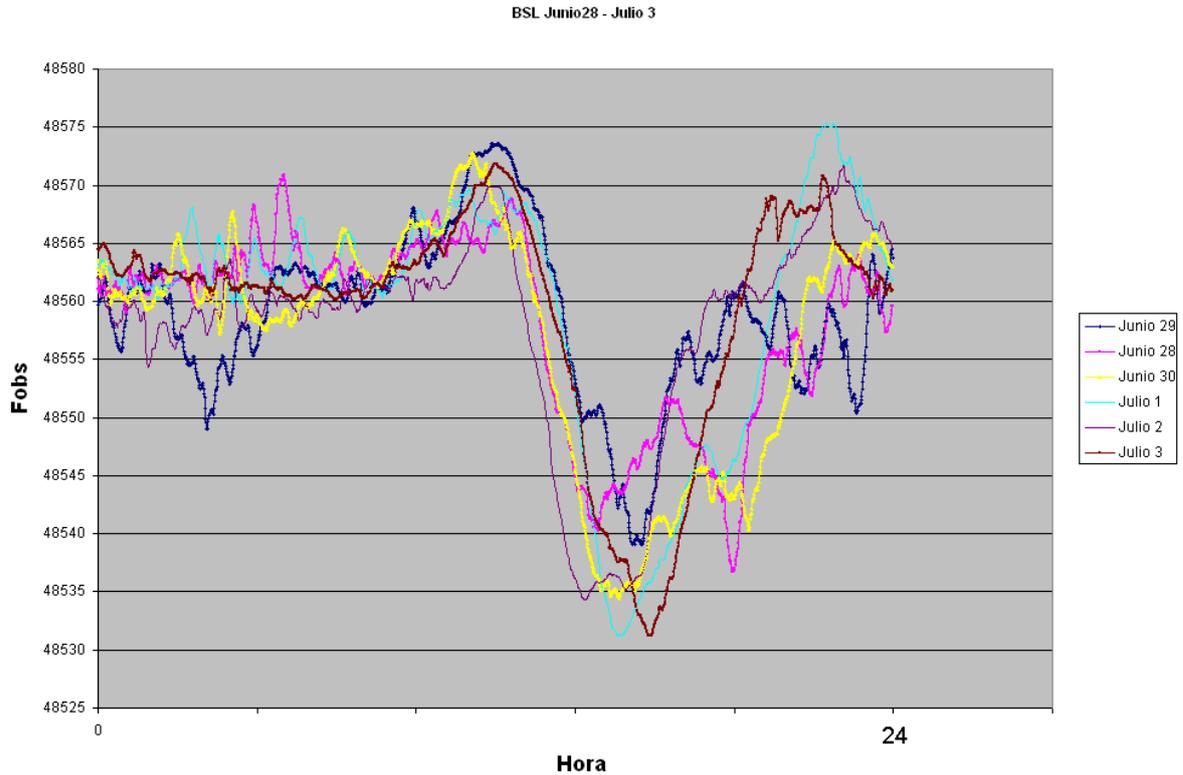
Figura 23. Transecto circular o Círculo de calibración para la campaña SIGSBEE11.

Para la reducción por IGRF en los datos del Círculo en SIGSBEE11 se utilizó el programa en FORTRAN (Apéndice B) y para la corrección por variación diurna se siguió el procedimiento de diferencias por cruces [Buchanan et al., 1996]. Este método se ajusta a las necesidades de exploraciones marinas principalmente cuando el área de prospección se encuentra a una distancia mayor de 100 mn de un posible sitio fijo donde se pudiera establecer una base magnética. Para esta corrección, la Figura 24 muestra las diferencias en valor observado en la hora de los cruces. Estos valores están agrupados por días, para este procedimiento se utilizaron dos principales grupos de datos.



**Figura 24. Agrupamiento por días de los datos de diferencias por cruces.
Con líneas de tendencia para los dos principales grupos.**

La Figura 24 muestra una tendencia para el grupo rojo correspondiente con el día 2 de Julio de 2008. Para ajustar este grupo a un modelo de corrección se agregó una curva de tendencia. Esta curva fue comparada con el modelo del observatorio geomagnético más cercano, en este caso la estación mas cercana era la de Stennis Space Center (BSL) en la frontera entre los estados de Missouri y Louisiana en los E.U.A. La Figura 25 muestra los registros en BSL para los días correspondientes a los de la campaña SIGSBEE11.



**Figura 25. Registro de base en BSL para los días Junio 29 a Julio3 del 2008.
Fobs son los valores magnéticos observados en nT.**

Habiendo comprobado que el registro de los datos de cruces para el día 2 de Julio presenta una tendencia muy parecida a la del grupo de registros en Stennis Space Center, aún cuando el observatorio se encuentra a más de 280 mn. Se procedió a obtener un polinomio de orden 6 (Figura 26) que aproximara una serie de tiempo representativa a la variación diurna para los datos del círculo de calibración, quedando representada en la siguiente ecuación.

$$f(t) = -0.00006t^6 + 0.00442t^5 - 0.11555t^4 + 1.43309t^3 - 8.88821t^2 + 26.19004t - 21.852575$$

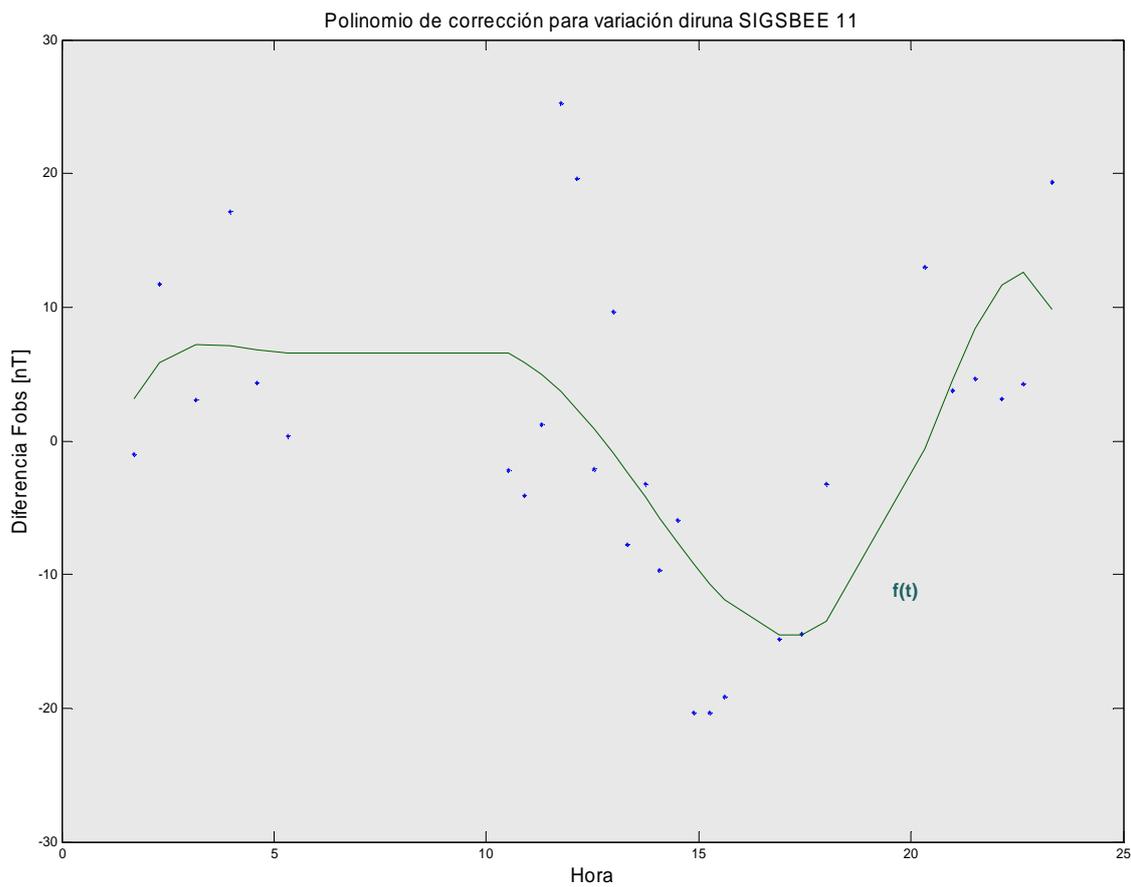


Figura 26. Polinomio $f(t)$ obtenido del método de diferencias por cruces.

En la subsecuente reducción de los datos del círculo, para corregirlos por el efecto de rumbo se utilizó el método de Bullard and Mason [1961], cuya curva de ajuste se ilustra en la Figura 27.

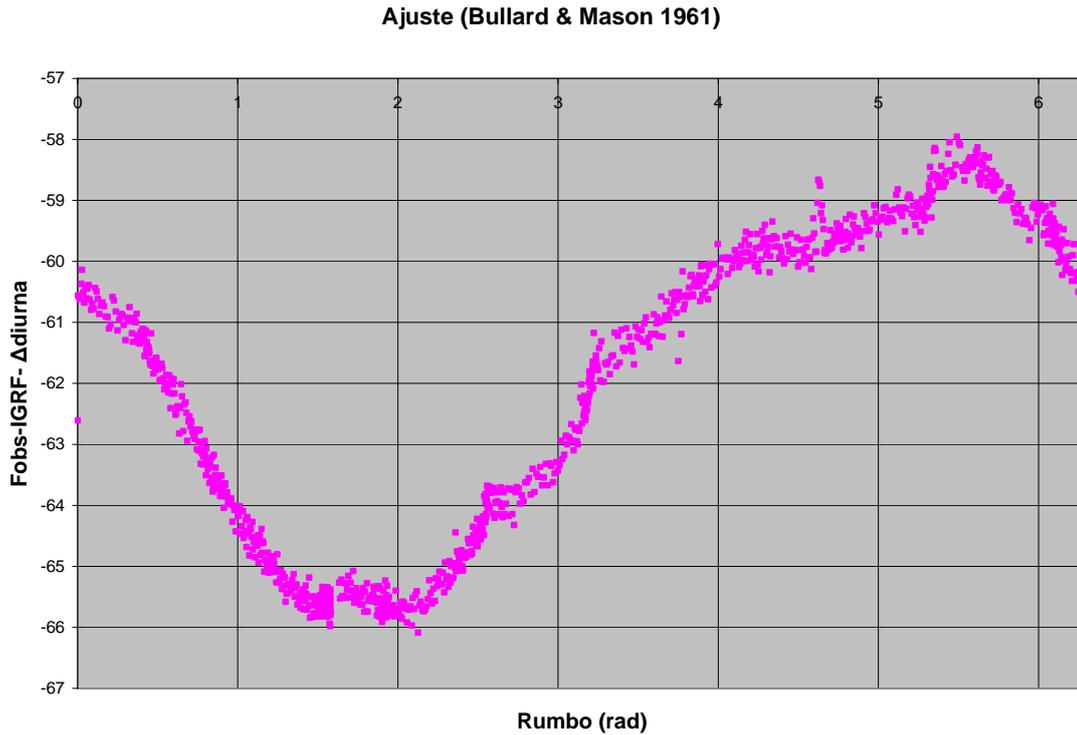


Figura 27. Ajuste de una curva para corrección por efecto de rumbo de un barco.

Los coeficientes de la siguiente ecuación se obtuvieron utilizando la fórmula de F_Q de la sección III.2.3, quedando como:

$$\Delta F_{m_{\text{rumbo}}}(\theta) = 0.01791905 \cos(\theta) - 0.5271591 \cos 2(\theta) - 58.51121277$$

El flujo completo de este método se encuentra en el apéndice D. Con esta corrección calculada se completó la ecuación para reducir los datos magnéticos marinos a su anomalía magnética, quedando la ecuación de la anomalía como:

$$\Delta F(\varphi, \lambda, t) = F_c(\varphi, \lambda, t) \pm F_{IGRF}(\varphi, \lambda, t)$$

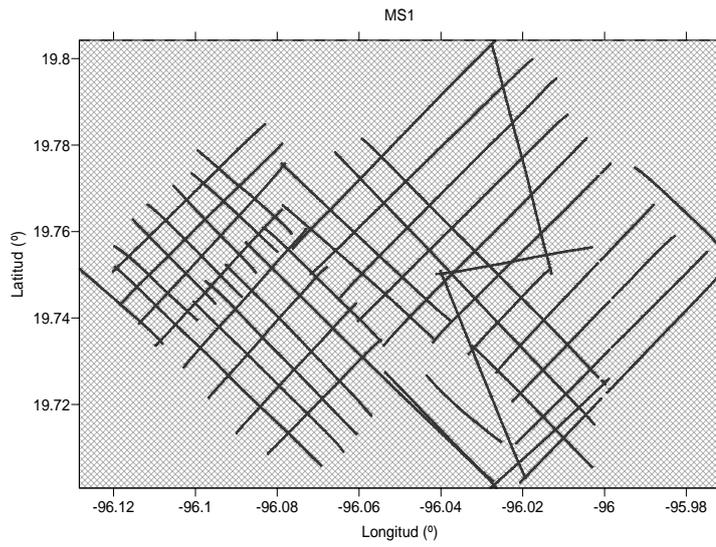
Donde :

$\Delta F(\varphi, \lambda, t)$ = Anomalía magnética

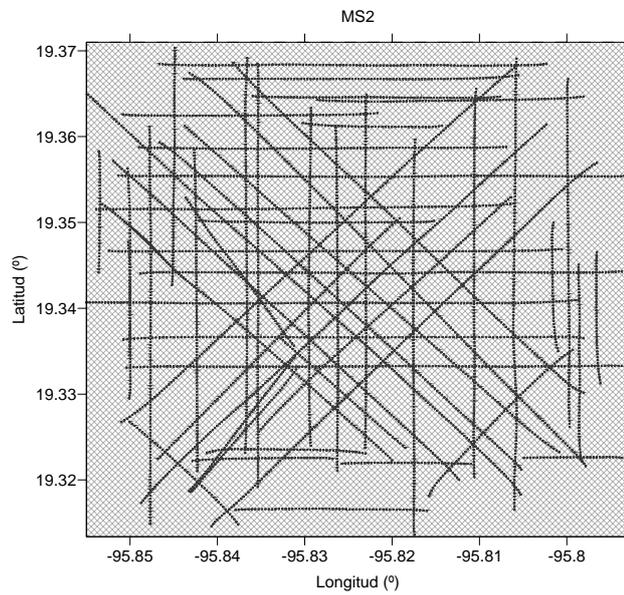
$F_c(\varphi, \lambda, t)$ = Valores magnéticos marinos corregidos

$F_{IGRF}(\varphi, \lambda, t)$ = Campo teórico, IGRF

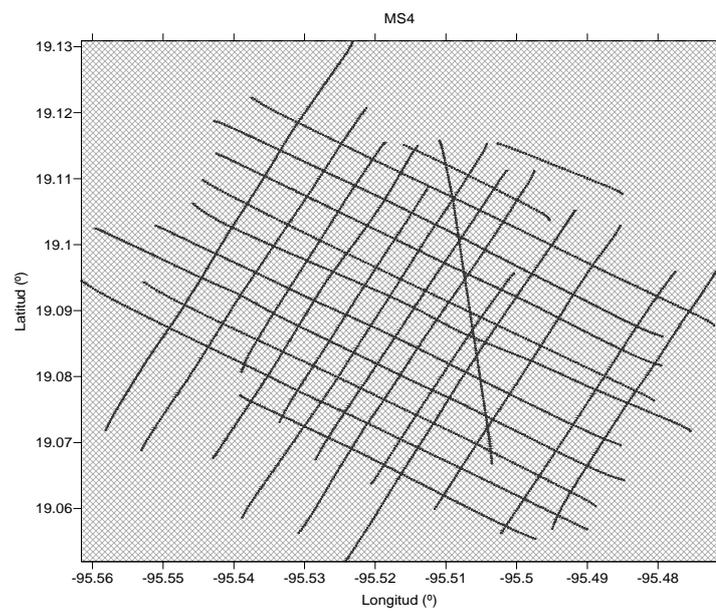
Esta fórmula es utilizada para integrar los mapas de anomalía magnética para cada área de los montes submarinos. Solo los valores de las anomalías magnéticas en las posiciones a lo largo de los transectos sin curvas para las tres áreas (Figura 28) son utilizados para la elaboración de las cartas magnéticas con curvas de contornos y de proyecciones geométricas en 3D.



a)



b)



c)

Figura 28. Transectos sin curvas en la campaña PMAG01 a) MS1, b) MS2, c) MS4.

La integración de las cartas magnéticas representativa de cada área es seleccionada analizando los resultados de los grupos de transectos con una dirección principal, debido a que en una dirección u otra los resultados diferían un poco. Selectivamente el criterio, que se utilizó para adoptar la imagen que representaría la anomalía magnética en el área del monte submarino, fue que el grupo de datos de transectos con una orientación particular tuviera una clara tendencia en las anomalías magnéticas y presentara muy poca efecto por la orientación de los transectos. Las Figuras 29, 30 y 31 presentan las cartas en contornos magnéticos y su respectiva proyección en 3D para cada área, MS1, MS2 y MS4 respectivamente. Para el área MS1 se prefirieron los perfiles SO-NE y NE-SO, para el área MS2 se escogieron los perfiles NS-SN, y para el área MS4 se seleccionaron los perfiles NO-SE y SE-NO.

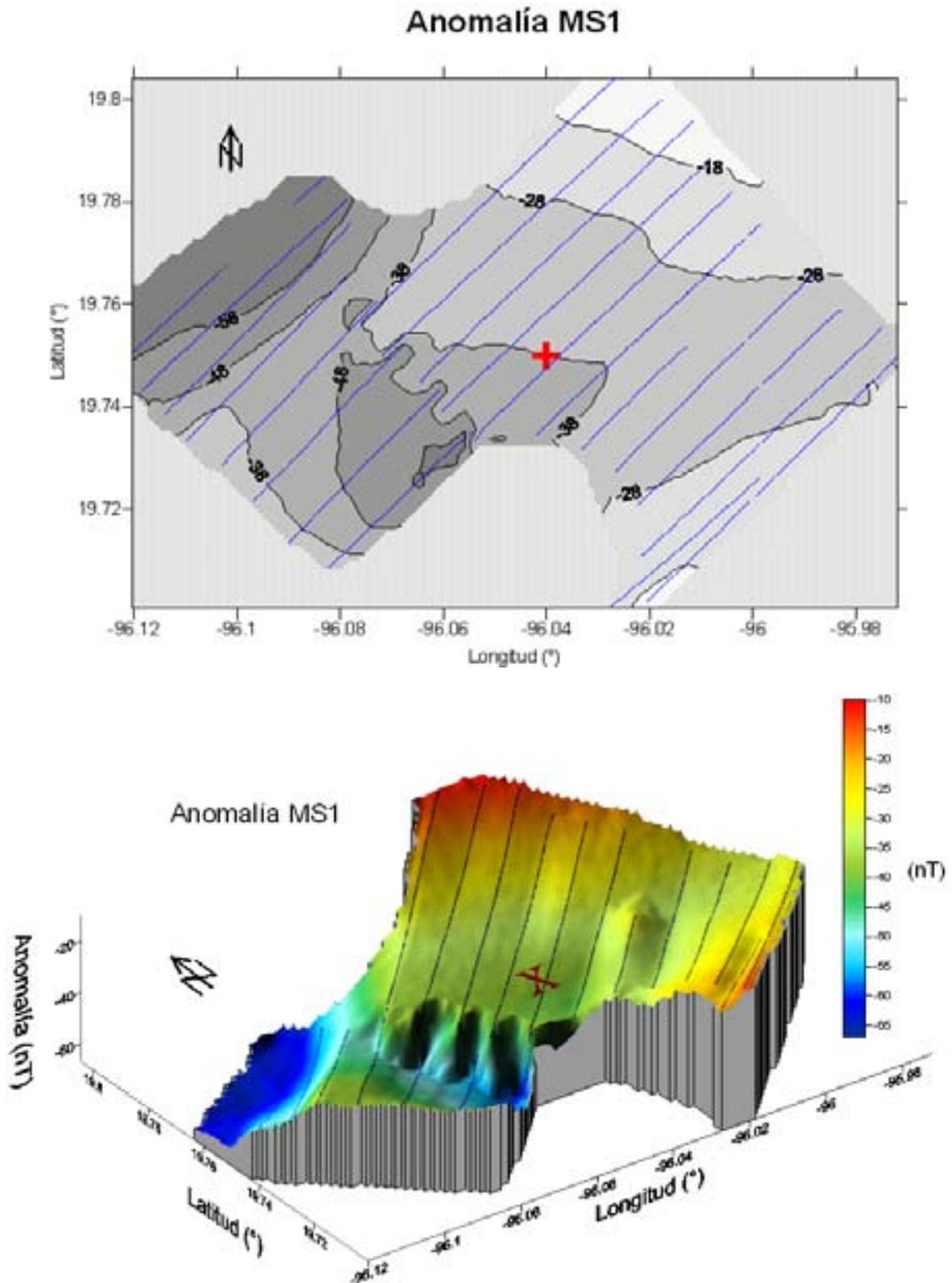


Figura 29. Anomalía magnética, monte MS1. En el panel superior se muestra la anomalía en mapa de contornos a cada 10 nT, en el panel inferior la proyección en 3D de la anomalía con una escala de colores que asigna rojos a los valores máximos y azules a los mínimos. En ambos paneles la cruz roja marca la localidad propuesta del monte MS1 y las líneas azules marcan los transectos de las líneas utilizadas en la elaboración de estos mapas.

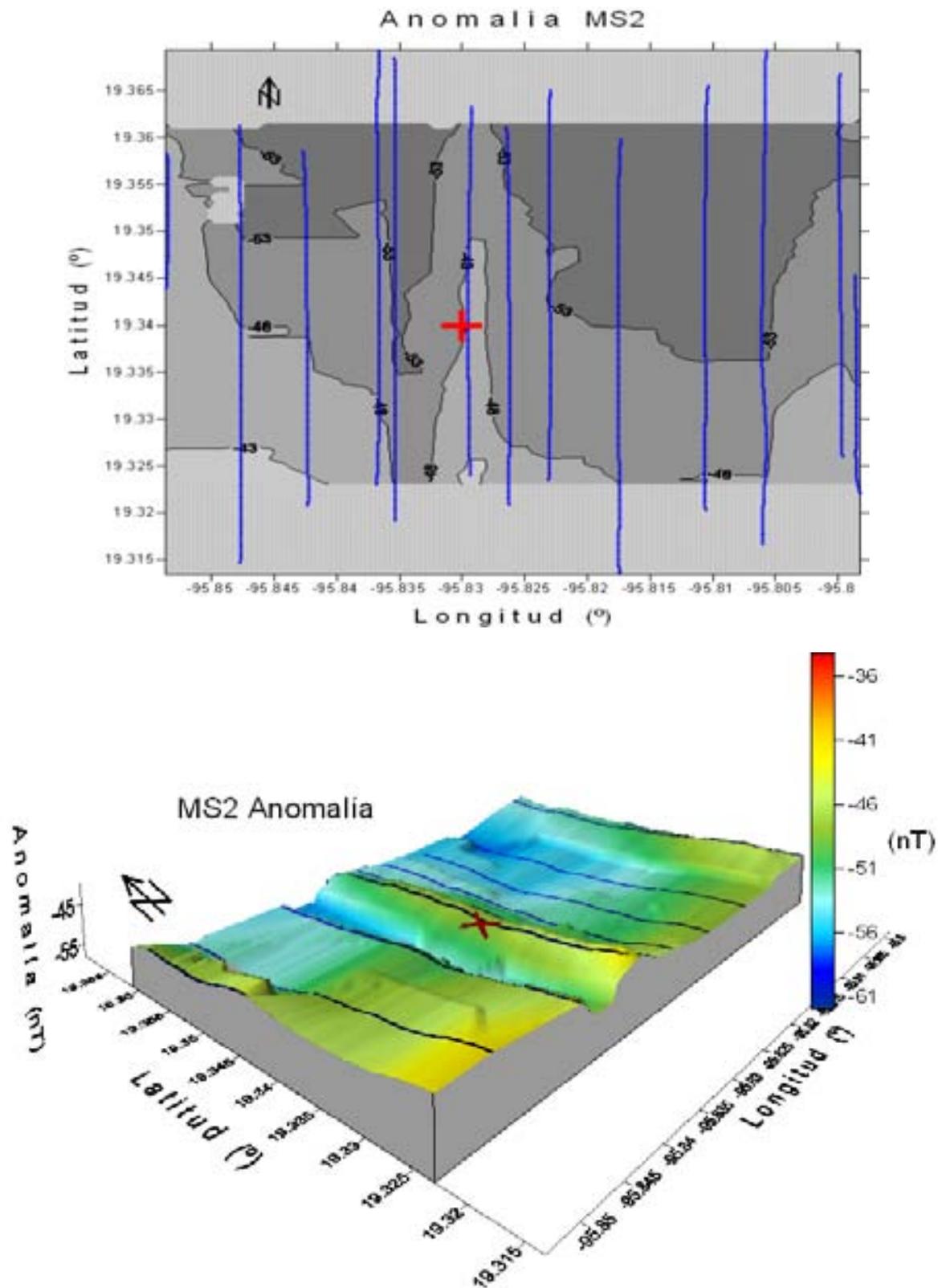


Figura 30. Anomalia magnética, monte MS2. En el panel superior se muestra la anomalía en mapa de contornos a cada 5 nT, en el panel inferior la proyección en 3D de la anomalía con una escala de colores que asigna rojos a los valores máximos y azules a los mínimos. En ambos paneles la cruz roja marca la localidad propuesta del monte MS2 y las líneas azules marcan los transectos de las líneas utilizadas en la elaboración de estos mapas.

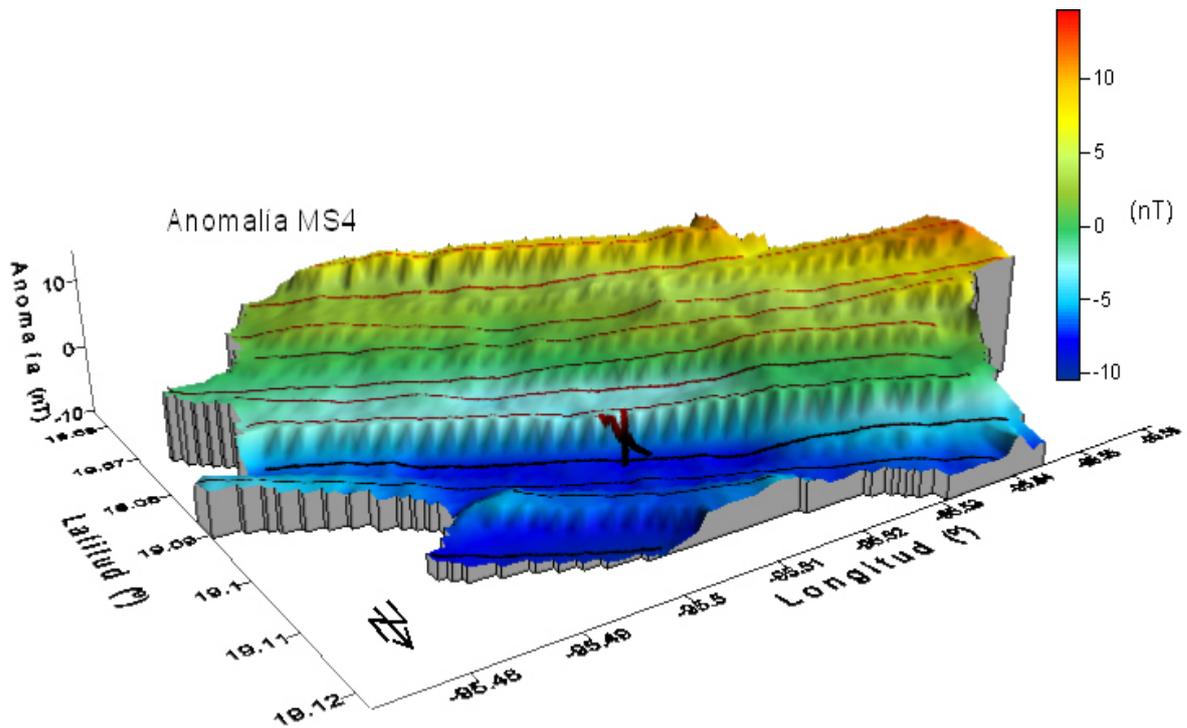
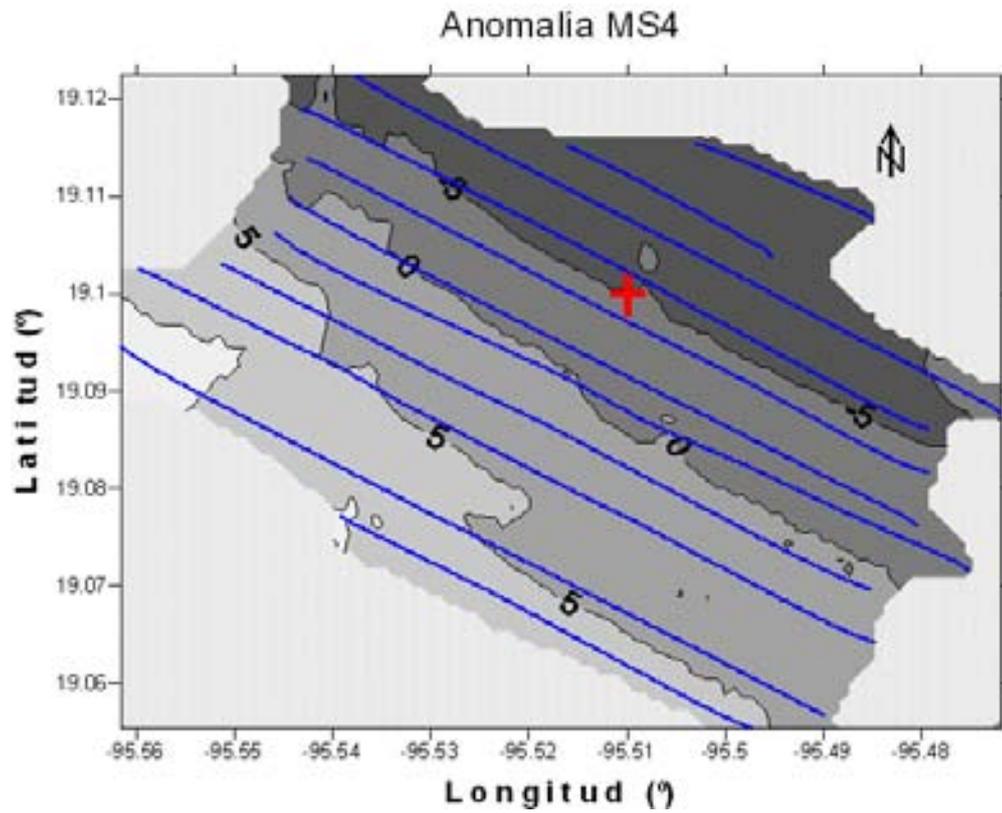


Figura 31. Anomalia magnética. Monte MS4. En el panel superior se muestra la anomalía en mapa de contornos a cada 5 nT, en el panel inferior la proyección en 3D de la anomalía con una escala de colores que asigna rojos a los valores máximos y azules a los mínimos. En ambos paneles la cruz roja marca la localidad propuesta del monte MS4 y las líneas azules marcan los transectos de las líneas utilizadas en la elaboración de estos mapas.

Por último se estimo la anomalía residual para las tres áreas. Esto se llevó a cabo a través de restar el regional magnético correspondiente a la forma del talud continental de la anomalía magnética. El regional fue estimado utilizando una aproximación por un polinomio de grado n que representara el efecto del talud presente en las áreas de estudio. Esta anomalía residual para cada área es ilustrada en perspectivas 3D (Figuras 32, 33 y 34). Para estas tres vistas magnéticas, una cruz y una línea negra sobre el residual marcan la localidad del monte submarino y su respectivo perfil sísmico que fueron reportados por Moore y Del Castillo [1974].

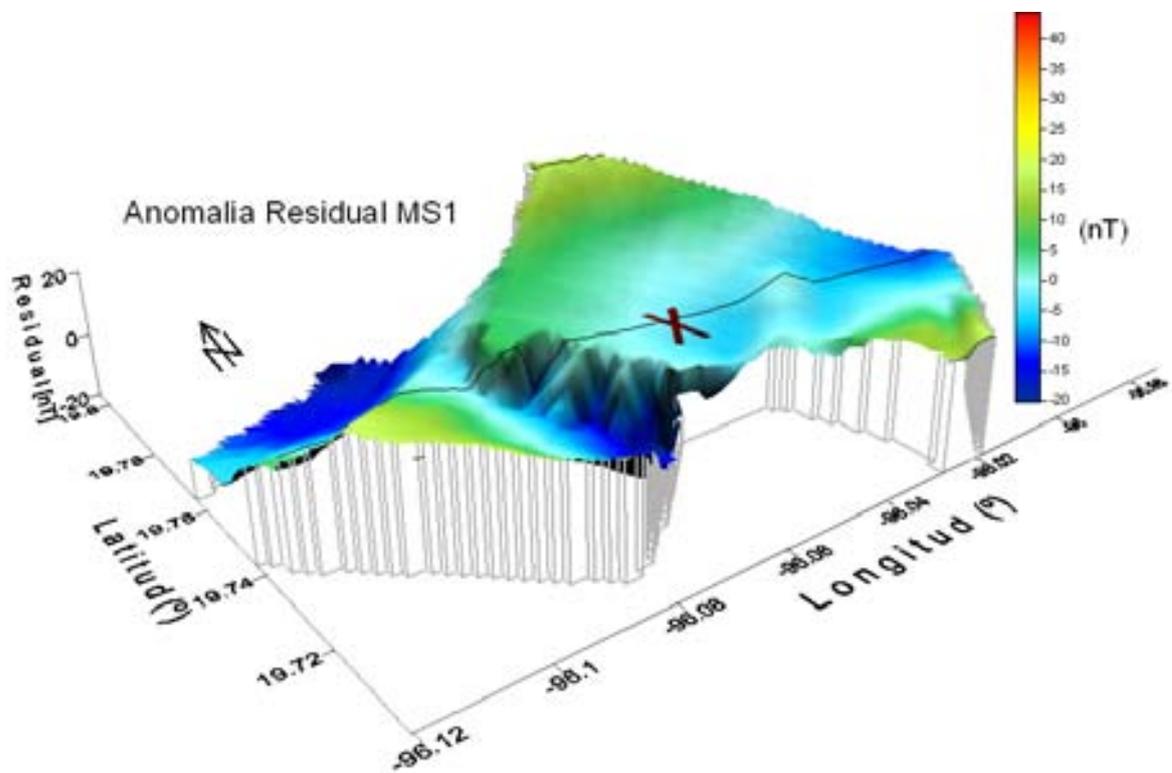


Figura 32. Residual magnético, monte MS1. La línea sólida marca el perfil 34 reportado por Moore y Del Castillo [1974]. La cruz es el sitio reportado del monte submarino MS1, y la escala de colores asigna rojos a los valores máximos y azules a los mínimos.

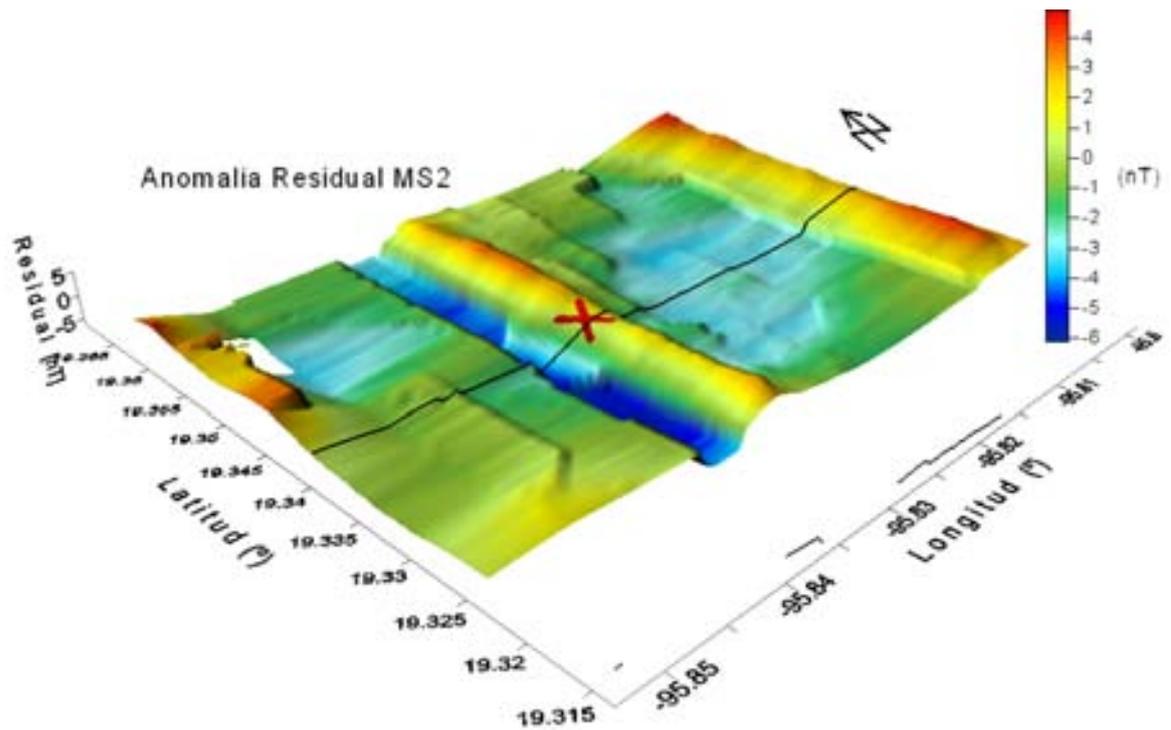


Figura 33. Residual magnético, monte MS2. La línea sólida marca el perfil 44 reportado por Moore y Del Castillo [1974]. La cruz es el sitio reportado del monte submarino MS2, y la escala de colores asigna rojos a los valores máximos y azules a los mínimos.

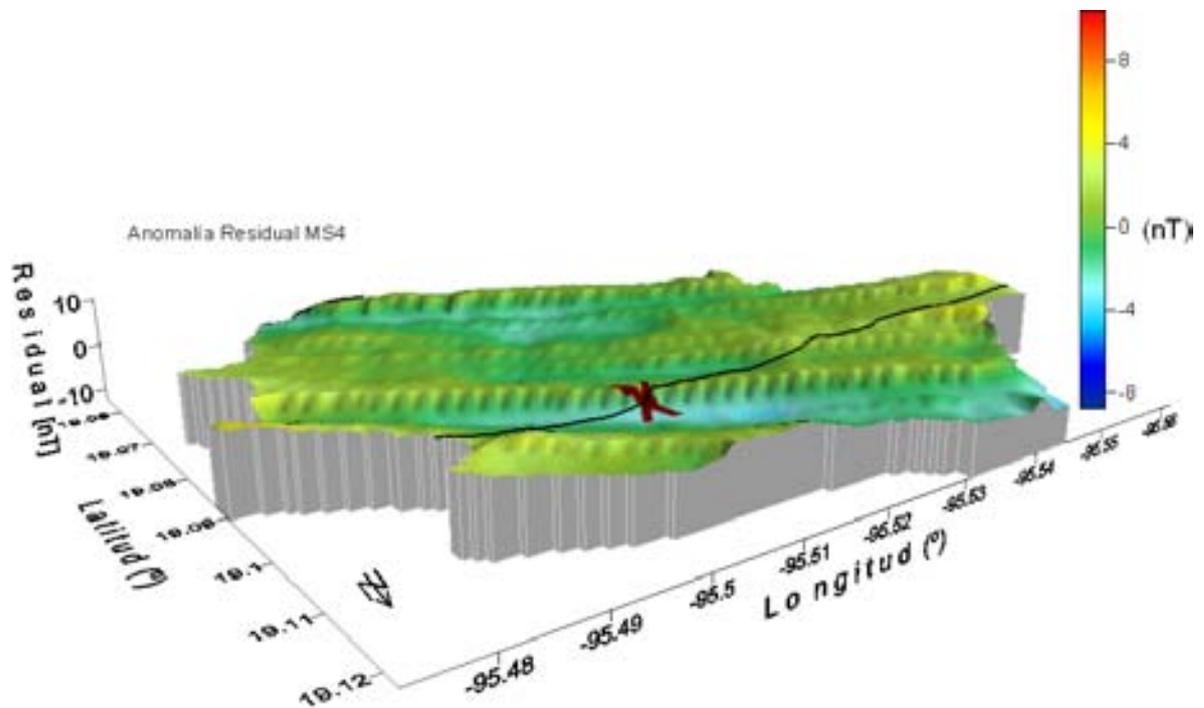


Figura 34. Residual magnético, monte MS4. La línea sólida marca el perfil 16 reportado por Moore y Del Castillo [1974]. La cruz es el sitio reportado del monte submarino MS4, y la escala de colores asigna rojos a los valores máximos y azules a los mínimos.

V. INTERPRETACIÓN

V.1. Batimetría

La morfología mostrada en los datos de batimetría presenta un relieve del talud que está conformado principalmente por dorsales y cañones que son producto del efecto de canalización por el drenaje que fluye desde la plataforma continental, estos resultados concuerdan con la descripción de las provincias fisiográficas que se espera en el Talud Occidental del Golfo de México.

Para la batimetría del área MS1 (la de mayor extensión de las tres áreas), la Figura 18 muestra que la línea sísmica 34 del *UnitedGeo I* [Moore y Del Castillo, 1974] cruza de manera casi transversal sobre dos de estas dorsales al aproximarse a la plataforma continental. Mientras que en la sección sísmica de la línea 34 en la Figura 5 se observan dos interrupciones abruptas en la tendencia de la pendiente del Talud, en proximidad al quiebre del talud y plataforma, siendo la mayor la de forma parecida al relieve de un monte submarino, como lo documento Moore y Del Castillo [1974]. Esta propuesta de que esta forma era un monte no se sustenta en este estudio al mostrar que en la carta de batimetría para el área MS1 en la Figura 18 estas interrupciones realmente no representan un monte submarino sino el cruce transversal del relieve de las dorsales.

Sin embargo para el caso del área MS2 no se muestran tan claramente estos relieves de montes en la morfología del Talud sobre la sección sísmica de la línea 44 (Figura 5), La carta de batimetría para el área MS2 (Figura 19) muestra que la línea 44 del *UnitedGeo I* no parece cruzar ninguna dorsal de mayores dimensiones, excepto casi en las proximidades del quiebre plataforma-talud donde es posible debido al posicionamiento satelital durante el estudio de 1971 que la línea 44 haya cruzado transversalmente alguna

saliente en la parte superior del talud, pero difícilmente se puede precisar que este fuera el caso.

El caso del monte en el área MS4, el relieve del talud cartografiado durante PMAG01 (Figura 20) muestra que la sección de la línea sísmica 16 del *UnitedGeo I* (Figura 5) ciertamente cruza una dorsal que corresponde a la forma de un monte en una perspectiva 2D. Comparando la forma del monte MS4 identificado en la sección sísmica 16 se observa que tiene mayores dimensiones que cualquiera de las cuatro formas identificadas en el estudio de Moore y Del Castillo [1974] y sería de esperarse que en el relieve batimétrico del área MS4 presentara una forma de monte; pero al contrario este levantamiento batimétrico de PMAG01 aporta que no existen formas en el relieve del lecho marino estructuras que semejen a un monte submarino en la parte alta del talud continental en el margen Occidental del Golfo de México.

La imprecisión del posicionamiento satelital en los 1970s pudiera explicar la falta de correspondencia de la posiciones de las líneas sísmicas que mostrara las formas de montes submarinos reportados por Moore y Del Castillo [1974] con el relieve del levantamiento batimétrico de PMAG01 que fue posicionado con GPS. Dentro de la incertidumbre del posicionamiento del buque en 1971, las localidades de los montes pudieran coincidir con las elevaciones de las dorsales identificadas con los datos de batimetría en PMAG01. El caso mas claro es el del área MS4 donde hay una diferencia de 2.1 km entre la ubicación reportada del monte y la posición de la cima de la dorsal obtenida durante la campaña PMAG01.

En resumen, el relieve del talud en las tres áreas muestra una pendiente suave y prolongada hacia el centro del Golfo con un relieve típico erosionada por las turbiditas que fluyen hacia la planicie abisal, formado múltiples cañones y dorsales, como se observa en el área MS1. En estas áreas, la superficie del relieve batimétrico del talud recién

cartografiado no muestra formas superficiales que pudieran estar asociadas a la incidencia de diapiros, como se han observado en la parte sur del Talud Occidental del Golfo de México. Desafortunadamente el presente estudio batimétrico marino estuvo limitado a registros de valores de profundidades menores de 1,200 m y por lo tanto el relieve del talud a mayores profundidades no pudo ser examinado.

V.2 Magnetometría

El proceso de reducción de los datos magnéticos arroja resultados muy coherentes para analizarlos en asociación a una anomalía magnética formada por estructuras de origen magmático que en caso de existir tuviera una forma cónica en las tres áreas. Los mapas de anomalías magnéticas en las tres áreas (Figuras 29, 30 y 31) no presentan formas que pudieran ser asociadas a montes submarinos de origen volcánico (Figura 35).

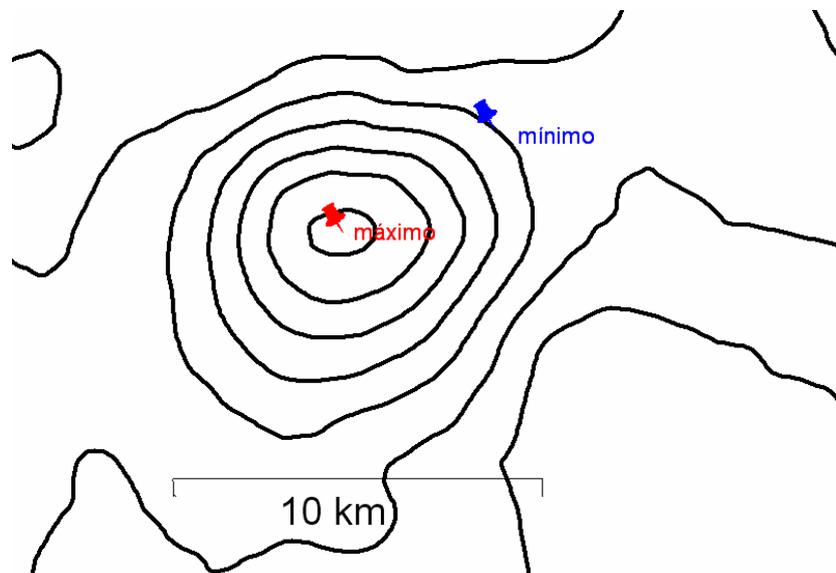


Figura 35. Anomalía magnética de forma cónica, característica de un volcán submarino. En este caso la diferencia entre el valor máximo y el mínimo es de alrededor de 400 nT.

Tampoco se observan anomalías prominentes que pudieran estar relacionadas a formas cónicas. Se observa que la tendencia de la anomalía magnética en el talud tiene la misma tendencia con la forma del relieve batimétrico, siendo que esta tendencia magnética

es el efecto regional inducido por el incremento de profundidades en el talud. Por lo que al ser sustraído el efecto regional de la anomalía magnética calculada, la anomalía residual es mínima (de 5 a 20 nT) y no presenta formas que pudieran ser asociadas a un monte submarino o estructura cónica, y es de inferirse que no existen rocas con minerales ferromagnéticos para crear una anomalía magnética que resaltara del campo regional del gran volumen de talud continental frente a Veracruz.

Si bien se pueden observar que la textura de lineamientos en el mapa de anomalía residuales (Figuras 32, 33 y 34) son producto de la huella de la prospección, más específicamente en el caso del área MS1. En esta área, el mapa de anomalía presenta una diferencia entre los valores de los transectos adquiridos al inicio de la primera etapa y de los adquiridos días después en esa primera etapa. Lo que provoca que la anomalía presente un escalón entre ambas series del orden de 5 nT. Pudiera ser esta diferencia producto de la corrección por rumbo, ya que los datos del círculo correspondió a otra campaña seis años después.

Por otro lado la anomalía residual en MS2 presenta unos lineamientos que obedecen a la orientación de los perfiles, reflejando la textura del levantamiento por el recorrido de buque y que se considera un efecto de la adquisición de los datos. Debido al espaciado en los perfiles magnéticos fue difícil remover esta textura. Sin embargo el efecto visual de la anomalía residual es acentuado por el graficado en 3D, siendo que la diferencia entre los máximos y los mínimos es de aproximadamente 10 nT y la tendencia general de la anomalía residual es casi plana.

Para el caso de la anomalía residual MS4, la tendencia es también casi plana y solo se ve afectada por la huella del levantamiento. La textura de la huella del levantamiento esta acentuada en el graficado de 3D, pero el rango de valores de la anomalía residual es de ± 5 nT para toda el área.

VI. CONCLUSIONES

Los datos de batimetría y magnetometría obtenidos durante la campaña oceanográfica PMAG01 no aportan evidencias geofísicas para sustentar la presencia de montes submarinos en el talud occidental del Golfo de México, frente a Veracruz como lo propusieron Moore and Del Castillo [1974]. El relieve de la batimetría integrado en este estudio muestra que la propuesta de Moore and Del Castillo está basada en una interpretación de los perfiles sísmicos en que no reflejan los relieves de estructuras en 3D por lo que este levantamiento no sustenta su propuesta. Los levantamientos de batimetría en PMAG01 claramente muestra que el relieve del talud está conformado por cañones y dorsales, producto de las turbiditas que erosionan el talud. Posiblemente la resolución espacial del levantamiento batimétrico en la campaña PMAG01 no fue suficiente para aportar un mayor detalle en formas más pequeñas en el relieve del lecho marino del talud en el margen occidental del Golfo de México.

Así también los datos de magnetometría no aportan evidencias geofísicas que sustenten la propuesta de Moore and Del Castillo [1974] de que las formas de montes submarinos son de origen magmático. Los datos magnéticos de PMAG01 muestran que no existe evidencia de anomalías magnéticas regionales y residuales que pudieran corresponder a estructuras geológicas compuestas de minerales ferromagnéticos.

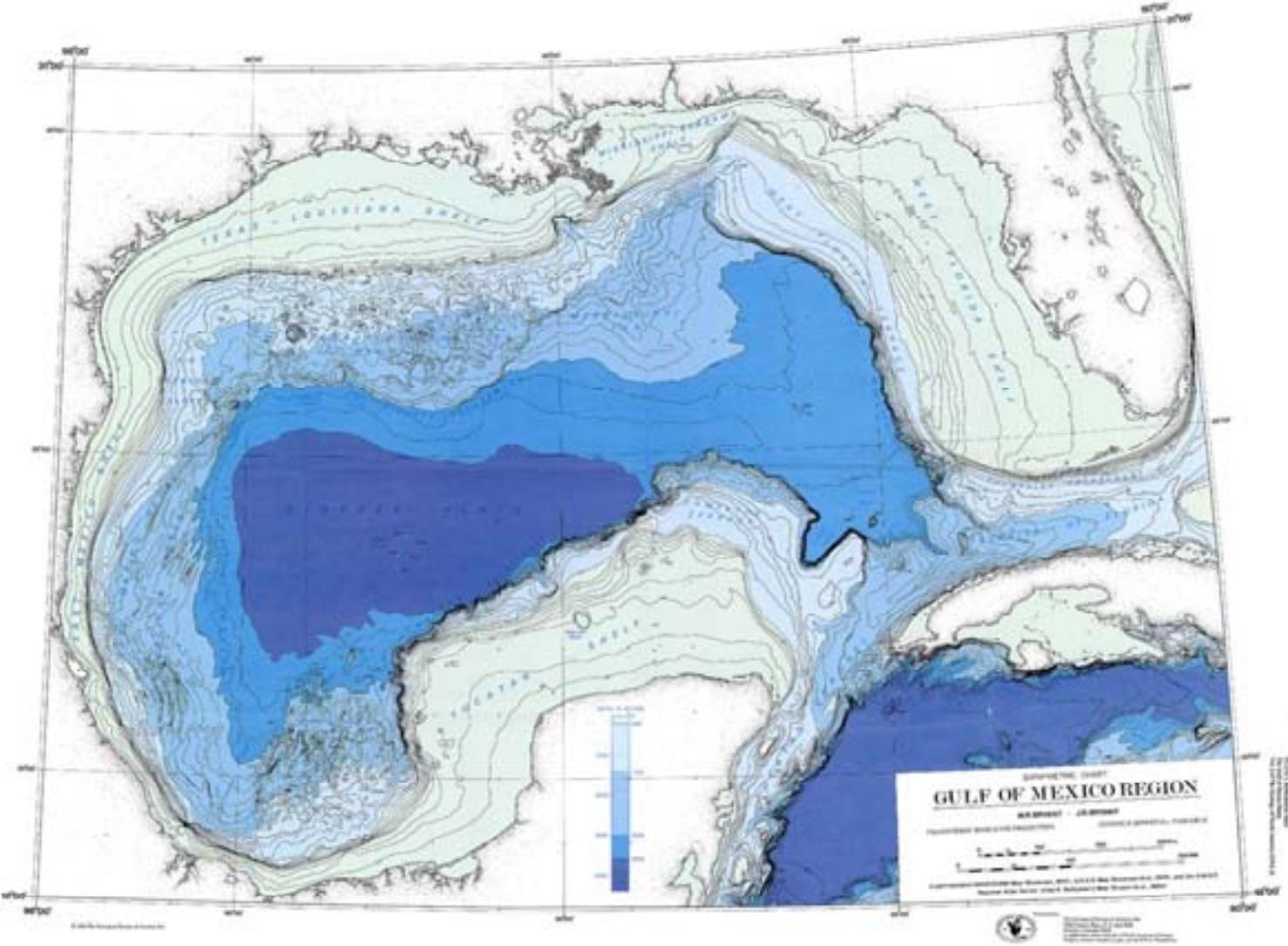
REFERENCIAS

- Bayley R.W., Muehlberger W.R.**, 1968, "Basement rock map of the United States", *U. S. Geol. Survey*, scale 1: 2 500 000, two sheets.
- Bloomfield K., Cepeda-Davila L.**, 1973, "Oligocene alkaline igneous activity in NE Mexico", *Geology Magazine*, v. 110, p. 551-555.
- Breiner S.**, 1973, "Applications manual for portable magnetometers", pp. 58, *Geometrics*, San Jose California, USA.
- Bryant W.R., Antoin J. e, Ewing M., and Jones B.**, 1968, "Structure of Mexican continental shelf and slope, Gulf of Mexico", *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 52, 1204-1228.
- Bullard E. C., Mason R. G.**, 1961, "The magnetic field astern of a ship", *Deep Sea Research*, 8(1), p. 20-27
- Buchanan S.K., Scrutton R.A., Edwards R.A., and Whitmarsh R.B.**, 1996, "Marine magnetic data processing in the equatorial region off Ghana, *Geophys. J. Int.*, 125, p. 123-131.
- Buffler R. T., Shaub F. J., Watkins J. S., and Worzel J. L.**, 1979, "Anatomy of the Mexican Ridges, southwestern Gulf of Mexico", in Watkins, J. S., ed., *Geological and geophysical investigations of continental margins: American Association of Petroleum Geologists Memoir 29*, p. 319-327.
- Chapman S., Bartels J.**, 1940, "Geomagnetism", *Ed. Clarendon Press*, V. 2,
- Engebretson D. C., Cox A., Gordon R. G.**, 1985, "Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific Basin", *Geological Society of America Special Paper 206*, 59 p.
- Ewing M., Worzel J. L., Ericson D. B., Heezen B. C.**, 1955, "Geophysical and geological investigations in the gulf of Mexico", *Geophysics*, v. 20, p. 1-18.
- Flores C. R.**, 2006, "Estudio de Geofísica marina con datos de batimetría y magnetimetría sobre la no existencia de volcanes submarinos en el Talud Continental del Golfo de México", tesis - UNAM. 61 p.
- Garrison L. E., Martin R. G., Jr.**, 1973, "Geologic structure in the Gulf of Mexico", *U.S. Geological Survey Professional Paper 773*, 85 p.
- Gary R. B.**, 1991, "The Geology of North America, Vol J. The Gulf of Mexico Basin", *The Geological Society of America*. ch. 6. *Igneous Activity*
- Geometrics, Inc.** (Eds), 2001, G-877 Marine magnetometer 25165-OM Rev. A Operation Manual, Geometrics, pp. 7-12, 18-31, Inc., San Jose, CA, USA.
- Langel R. A.**, 1987, "The main field, in *Geomagnetism*", volume 1, *edited by J. A. Jacobs*, pp. 249-512, Academic, San Diego, Calif.
- Langel R. A.**, 1991, "International Geomagnetic Reference Field, 1991 revision", *PAGEOPH*, v. 137, 3.
- Lopez Ramos E.**, 1981, "Geologia de Mexico", *2nd ed., volume 3: Mexico City*, 445 p.

- Martín R. G., Bouma A. H.**, 1978, "Physiography of Gulf of Mexico", in Bouma A. H., Moore, G. T., and Coleman, J. M., eds.. *Framework, facies, and oil-trapping characteristics of the upper continental margin: American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology* 7, p. 3-19.
- Moore G.W., and others**, 1972, "Acoustic-reflection profiles, Bay of Campeche", *Nat. Tech. Inf. Service Rept.*, PB2-07594, p. 34.
- Moore G. W., Del Castillo L.**, 1974, "Tectonic evolution of the southern Gulf of Mexico", *GSA Bulletin*, 85, 607-618.
- Mooser F.**, 1958, "Active volcanoes of Mexico", in *Catalogue of active volcanoes of the world including solfatara fields*, Pt. 6: Naples, Italy, Internat. Volcanol. Assoc., p. 1-36.
- Mortera-Gutiérrez C. A., Bandy W.L., and others**, 2002, "Evidencia batimétrica y magnética de no existencia de volcanes marinos en el talud continental del Golfo de México enfrente de la costa de Veracruz", *Geos, Unión Geofísica Mexicana*, 22, 223.
- Mortera Gutiérrez, C.A., E. Escobar Briones, W.L. Bandy William, F. Ponce Núñez, D. González Reyes, I. Rufino Contreras, D. Pérez Calderón, H. Tecanhuey Sánchez, J.R. Peláez Gaviria y J. Ortega Ramírez**, 2008, SIGSBEE 11, "Resultados Preliminares del Levantamiento Geofísico del Lecho Marino en el Polígono Oriental Internacional del Golfo de México a Bordo del BO Justo Sierra", *Geos, Unión Geofísica Mexicana*, 28, 128.
- Mortera-Gutiérrez, C.A., W.L. Bandy, R.M. Prol-Ledesma, C. Canet-Miguel, J.R. Ortega-Ramírez, J. Urrutia-Fucugauchi, H. Pérez-Mortera, J.R. Peláez-Gavira, G. Pardo-Castro, G.S. Serrato-Díaz, K. Mendoza-Cervantes, F. Rodríguez-Chavez, M. Manea, V.C. Manea, J.C. Cruz-Ocampo, A. Molina-Cruz, M.L. Machain-Castillo, E. Arellano-Torres, and J.H. Flores-Ruiz**, 2002, "3D Bathymetry and Magnetic Evidence of no Existence of Volcanic Edifices on the Gulf of Mexico Continental Slope Offshore the Veracruz Coast, México", *EOS, Trans. AGU* 83 (47), *Fall Meet. Suppl., Abstract V11A-1362*, F1462.
- Pew E.**, 1982, "Seismic structural analysis of deformation in the southern Mexican Ridges" [*M.A. thesis*], Austin, University of Texas at Austin, 102 p.
- Riddihough R. P.**, 1976, "Ageological Framework for the continental margin to the west of Ireland", *Geological Journal*, v. 11, I. 2, p. 109-120.
- Robin C., Tournon J.**, 1978, "Spatial relations of andesitic and alkaline provinces in Mexico and Central America", *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15, 1633-1641.
- Salvador A.**, 1991, The Gulf of Mexico Basin in "The Geology of North America.", *The Geological Society of America*. 568 p.
- Viniegra O., Castillo-Tejero C.**, 1970, "Golden Lane Fields, Veracruz, Mexico", *Am. Assoc. Petroleum Geologists Mem*, 14, p. 309-325.
- Whitmarsh R. B., Jones M. T.**, 1969, "Daily variation and secular variation of the geomagnetic field from shipboard observations in the Gulf of Aden", *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, Vol. 18, p. 477 - 488
- William R. B., Lugo J. and Cordova C., Amos S.**, 1991, "The Geology of North America, Vol J. The Gulf of Mexico Basin", *The Geological Society of America*. ch. 2. *Physiography and Bathymetry*.

Apéndice A

Carta fisiográfica y batimétrica de la cuenca del Golfo de México



Apéndice B

Código FORTRAN – Programa IGRF10-2005

```
PROGRAM IGRF10
C
c MAIN driver by W.Bandy, sept 2005 for use in reducing Marine data input
c from a file.
c the input file should have the following format:
c          FT(f9.3),1x,date(a8),1x,Time (a12),1x,long (f12.7),1x,lat(f11.7)
c where
c col 1-8: FT is the total field in nT. (Variable type real)
c 11-18: date= character*8 format, mm/dd/yy
c 22-33: Time= character*12 format hh/mm/ss.sss
c 36-47: lon = decimal degrees either 0 to 360 or -180 to 180
c          (double precision real)
c 49-58: lat = decimal degrees -90 to 90 (double precfision real)
c
c
c          The input data must lie within a single year. If the cruise extends
c into a new year, you need to divide the file.
c-----
c
c Input file Example (Create in Surfer from the .int files of MAGLOG by
c importing the .int file and deleting unwanted columns
c and then saving as a .csv file)
c NOTE: Note: Some problems encountered. In windows explorer file list,
c the saved files appear without the .csv extension, even if you
c explicitly typed it when saving in Surfer (another fine windows
c product!). However,depending on how you saved the file in
c Surfer, you may still have to type the .csv extension in order for
c IGRF10 to recognize the input file. So, if you have problems try
c entering the file name with and without the .csv extension.
c
c          41085.12,"10/28/04","05:08:31.695",-105.0078921,19.267119
c          41085.17,"10/28/04","05:08:41.689",-105.008252,19.2673252
c          41085.35,"10/28/04","05:08:43.692",-105.0083252,19.2673672
c          41085.67,"10/28/04","05:08:45.695",-105.0083967,19.2674082
c          41086.38,"10/28/04","05:08:47.698",-105.008471,19.267451
c-----
C This is a program for synthesising geomagnetic field values from the
C International Geomagnetic Reference Field series of models as agreed
c in December 2004 by IAGA Working Group V-MOD.
C It is the 10th generation IGRF, ie the 9th revision.
C The main-field models for 1900.0, 1905.0,...1940.0 and 2005.0 are
C non-definitive, those for 1945.0, 1950.0,...2000.0 are definitive and
C the secular-variation model for 2005.0 to 2010.0 is non-definitive.
C
C Main-field models are to degree and order 10 (ie 120 coefficients)
C for 1900.0-1995.0 and to 13 (ie 195 coefficients) for 2000.0 onwards.
C The predictive secular-variation model is to degree and order 8 (ie 80
C coefficients).
C
c
c Adapted from 8th generation version to include new maximum degree for
c main-field models for 2000.0 and onwards and use WGS84 spheroid instead
c of International Astronomical Union 1966 spheroid as recommended by IAGA
c in July 2003. Reference radius remains as 6371.2 km - it is NOT the mean
c radius (= 6371.0 km) but 6371.2 km is what is used in determining the
c coefficients. Adaptation by Susan Macmillan, August 2003 (for
c 9th generation) and December 2004.
c Notes:
c          1. Dates passed into subroutine igrf10syn are in decimal years.
c-----
c Input definitions:
c          1. Input latitudes and longitudes in decimal degrees
c          2. Geodetic Coordinate system is used
c          3. year (date) is fraction of years (i.e. 2000.0110)
c          4. Year is rounded to the nearest hour.
c          5. Altitude is set to zero.
c          5. colat 0 to 180
c          7. longitude 0 to 360
```

```

IMPLICIT none

      real*8 lat,long,rdate,alt,clt,dum1,dum2,dum3,F
      real*8 numdays,fracday,fracyr,elong
      real*8 TMagIn,Anomaly,rsec,fracmin,jdjuan
      integer mm,dd,yy,hr,min,leapyr,startjd,recnum,jd,id
      integer ifracmin,ianom,itmag,ilat,ilong,julday,jdcheck
      character*8 CharDate,cid
      character*12 Time
CHARACTER*40 infile

      id=5
      ALT=0.0d00

      write(6,*)'WARNING, THE DATA IN THE INPUT FILE MUST HAVE ALL'
      write(6,*)'      BEEN COLLECTED DURING A SINGLE YEAR!!'
      write(6,*)'enter cruise ID (a8) for ngd77 record.'
      read(5,1)cid
1      format(a8)

      WRITE(6,*)'Enter name of input file (40 characters maximum)'
      READ (5,10)infile
10     format(a40)
      open(20,file=infile,status='old')
      open(30,file='xyzout',status='new')
      open(40,file='ngd77out',status='new')
      open(50,file='errors',status='new')
      write (6,*)'Enter the year in which the data was collected'
      read(5,*)yy

      write (6,*)'Enter 1 if input is already in julian days'
      write (6,*)'Enter 0 otherwise'
      read(5,*)jdcheck

      startjd=julday(01,01,yy)

      write(6,*)'Enter 1 if the data was collected during a leap year'
      write(6,*)'Otherwise enter 0'
      read(5,*)leapyr
      if(leapyr.eq.0)then
          numdays=365.0d00
      else
          numdays=366.0d00
      endif

      write(30,7)
7      format(T3,'Longitude',T17,'Latitude',T30,'Anomaly',T40,'JD')

      recnum=0

      Do While (.NOT.EOF(20))
          recnum=recnum+1
      c      write(6,*)recnum
          If(jdcheck.eq.0)then
      c convert day to fraction of a year
          read(CharDate,16)mm,dd
16         format(i2,1x,i2)

          jd=julday(mm,dd,yy)

          read(time,17)hr,min,rsec
17         format(i2,1x,i2,1x,f6.3)
          fracmin=float(min)+rsec/60.0
          ifracmin=nint(fracmin*1000)
          fracday=(dble(hr)+(dble(min)/60.0d00))/24.0d00
          fracyr=(dble(jd-startjd)+fracday)/numdays
          RDATE=dble(yy)+fracyr

          else

          read(20,*,err=99,end=999)TMagIn,jdjuan,long,lat
          fracyr=dble(jdjuan/numdays)

```

```

        RDATE=dble(yy)+fracyr
    endif

    IF (lat.LT.-90.0.OR.lat.GT.90.0)then
        write(50,*)'bad lat in record #:',recnum,'record skipped'
        GOTO 99
    endif
    IF (long.LT.-180.0.OR.long.GT.360.0) then
        write(50,*)'bad longitude in record #:',recnum,'record skipped'
        GOTO 99
    endif
    convert lat to colat
c   CLT = 90.0 - lat
c   convert longitude to east longitude (0 to 360)
    if (long.lt.0.0d00)then
        Elong=360.0d00+long
!clt=colatitude
    else
        Elong=long
    endif

    CALL IGRF10SYN (0,RDATE,1,ALT,CLT,Elong,dum1,dum2,dum3,F)      !F=total field in nT

c   Correct total field data and write to two files
c   (1) (MGD77 Format)
c   (2) xyz (lat,long,anomaly).
c
    Anomaly=TMagIn-F
    write(30,30)long,lat,anomaly,jdjuan
30  format(f12.7,',',f12.7,',',f10.2,',',f16.12)
c
c   convert to integer format for ngd77 record output
c
    ilat=nint(lat*100000.0)
    ilong=nint(long*100000.0)
    itmag=nint(TMagIn*10.0)
    ianom=nint(anomaly*10.0)
    write(40,32)id,cid,yy,mm,dd,hr,ifracmin,ilat,ilong,itmag,ianom
32  format(i1,a8,t13,i4,3i2,i5,i8,i9,t61,i6,t73,i6)
99  continue
    enddo

    close(20)
    close(30)
    close(40)
    close(50)

999  continue

    STOP
    END
C -----
    FUNCTION JULDAY(MM,ID,IYYY)
    Parameter (IGREG=15+31*(10+12*1582))

    integer mm,id,iyyy,jy,jm,julday,igreg,ja

    if (mm.gt.2) then
        jy=iyyy
        jm=mm+1
    else
        jy=iyyy-1
        jm=mm+13
    endif
    julday=int(365.25*jy)+int(30.6001*jm)+id+1720995
    if (id+31*(mm+12*iyyy).ge.igreg)then
        ja=int(0.01*jy)
        julday=julday+2-ja+int(0.25*ja)
    endif
    return
end
c -----

subroutine igrf10syn (isv,date,itype,alt,colat,elong,x,y,z,f)
c

```

```

c This is a synthesis routine for the 10th generation IGRF as agreed
c in December 2004 by IAGA Working Group V-MOD. It is valid 1900.0 to
c 2010.0 inclusive. Values for dates from 1945.0 to 2000.0 inclusive are
c definitive, otherwise they are non-definitive.
c INPUT
c isv = 0 if main-field values are required
c isv = 1 if secular variation values are required
c date = year A.D. Must be greater than or equal to 1900.0 and
c less than or equal to 2015.0. Warning message is given
c for dates greater than 2010.0. Must be double precision.
c itype = 1 if geodetic (spheroid)
c itype = 2 if geocentric (sphere)
c alt = height in km above sea level if itype = 1
c = distance from centre of Earth in km if itype = 2 (>3485 km)
c colat = colatitude (0-180)
c elong = east-longitude (0-360)
c alt, colat and elong must be double precision.
c OUTPUT
c x = north component (nT) if isv = 0, nT/year if isv = 1
c y = east component (nT) if isv = 0, nT/year if isv = 1
c z = vertical component (nT) if isv = 0, nT/year if isv = 1
c f = total intensity (nT) if isv = 0, rubbish if isv = 1
c
c To get the other geomagnetic elements (D, I, H and secular
c variations dD, dH, dI and dF) use routines ptoC and ptoCv.
c
c Adapted from 8th generation version to include new maximum degree for
c main-field models for 2000.0 and onwards and use WGS84 spheroid instead
c of International Astronomical Union 1966 spheroid as recommended by IAGA
c in July 2003. Reference radius remains as 6371.2 km - it is NOT the mean
c radius (= 6371.0 km) but 6371.2 km is what is used in determining the
c coefficients. Adaptation by Susan Macmillan, August 2003 (for
c 9th generation) and December 2004.
c

```

```

implicit double precision (a-h,o-z)
dimension gh(3060),g0(120),g1(120),g2(120),g3(120),g4(120),
1 g5(120),g6(120),g7(120),g8(120),g9(120),ga(120),
2 gb(120),gc(120),gd(120),ge(120),gf(120),gg(120),
3 gi(120),gj(120),gk(195),gl(195),gm(195),gp(195),
4 p(105),q(105),cl(13),sl(13)
equivalence (g0,gh( 1)),(g1,gh(121)),(g2,gh(241)),(g3,gh(361)),
1 (g4,gh(481)),(g5,gh(601)),(g6,gh(721)),(g7,gh(841)),
2 (g8,gh(961)),(g9,gh(1081)),(ga,gh(1201)),
3 (gb,gh(1321)),(gc,gh(1441)),(gd,gh(1561)),
4 (ge,gh(1681)),(gf,gh(1801)),(gg,gh(1921)),
5 (gi,gh(2041)),(gj,gh(2161)),(gk,gh(2281)),
6 (gl,gh(2476)),(gm,gh(2671)),(gp,gh(2866))

```

```

c
c data g0/ -31543.,-2298., 5922., -677., 2905.,-1061., 924., 1121., 1900
1 1022.,-1469.,-330., 1256., 3., 572., 523., 876., 1900
2 628., 195., 660., -69., -361.,-210., 134., -75., 1900
3 -184., 328., -210., 264., 53., 5., -33., -86., 1900
4 -124., -16., 3., 63., 61., -9., -11., 83., 1900
5 -217., 2., -58., -35., 59., 36., -90., -69., 1900
6 70., -55., -45., 0., -13., 34., -10., -41., 1900
7 -1., -21., 28., 18., -12., 6., -22., 11., 1900
8 8., 8., -4., -14., -9., 7., 1., -13., 1900
9 2., 5., -9., 16., 5., -5., 8., -18., 1900
a 8., 10., -20., 1., 14., -11., 5., 12., 1900
b -3., 1., -2., -2., 8., 2., 10., -1., 1900
c -2., -1., 2., -3., -4., 2., 2., 1., 1900
d -5., 2., -2., 6., 6., -4., 4., 0., 1900
e 0., -2., 2., 4., 2., 0., 0., -6./ 1900
...

```

*** En esta sección irían los coeficientes correspondientes a los años de 1905 a 2005. Estos coeficientes están disponibles en Internet.

```

...
c data gp/ 8.8, 10.8, -21.3, -15.0, -6.9, -23.3, -1.0, -14.0, 2007
1 -0.3, -3.1, 5.4, -0.9, -6.5, -6.8, -2.0, -2.5, 2007
2 2.8, 2.0, -7.1, 1.8, 5.9, 5.6, -3.2, 0.0, 2007
3 -2.6, 0.4, 0.1, -3.0, 1.8, -1.2, 2.0, 0.2, 2007
4 4.5, -0.6, -1.0, -0.8, 0.2, -0.4, -0.2, -1.9, 2007
5 2.1, -0.4, -2.1, -0.4, -0.4, -0.2, 1.3, 0.9, 2007
6 -0.4, 0.0, 0.8, -0.2, 0.4, 1.1, 0.1, 0.6, 2007
7 0.2, 0.4, -0.9, -0.5, -0.3, 0.9, 0.3, -0.2, 2007
8 0.2, -0.2, -0.2, 0.2, 0.2, 0.2, -0.2, 0.4, 2007

```

```

9      0.2, 0.2, 0.5, -0.3, -0.7, 0.5, 0.5, 0.4, 2007
a      115*0.0/                                2007
c
c  set initial values
c
x      = 0.0
y      = 0.0
z      = 0.0
if (date.lt.1900.0.or.date.gt.2015.0) go to 11
if (date.gt.2010.0) write (6,960) date
960 format (' This version of the IGRF is intended for use up',
1      ' to 2010.0.'/' values for',f9.3,' will be computed',
2      ' but may be of reduced accuracy'/)
if (date.ge.2005.0) go to 1
t      = 0.2*(date - 1900.0)
ll     = t
one    = ll
t      = t - one
if (date.lt.1995.0) then
nmx    = 10
nc     = nmx*(nmx+2)
ll     = nc*ll
kmx    = (nmx+1)*(nmx+2)/2
else
nmx    = 13
nc     = nmx*(nmx+2)
ll     = 0.2*(date - 1995.0)
ll     = 120*19 + nc*ll
kmx    = (nmx+1)*(nmx+2)/2
endif
tc     = 1.0 - t
if (isv.eq.1) then
tc     = -0.2
t      = 0.2
end if
go to 2
c
1 t    = date - 2005.0
tc     = 1.0
if (isv.eq.1) then
t      = 1.0
tc     = 0.0
end if
ll     = 2670
nmx    = 13
nc     = nmx*(nmx+2)
kmx    = (nmx+1)*(nmx+2)/2
2 r    = alt
one    = colat*0.017453292
ct     = cos(one)
st     = sin(one)
one    = elong*0.017453292
cl(1) = cos(one)
sl(1) = sin(one)
cd     = 1.0
sd     = 0.0
l      = 1
m      = 1
n      = 0
if (itype.eq.2) go to 3
c
c  conversion from geodetic to geocentric coordinates
c  (using the WGS84 spheroid)
c
a2     = 40680631.6
b2     = 40408296.0
one    = a2*st*st
two    = b2*ct*ct
three  = one + two
rho    = sqrt(three)
r      = sqrt(alt*(alt + 2.0*rho) + (a2*one + b2*two)/three)
cd     = (alt + rho)/r
sd     = (a2 - b2)/rho*ct*st/r
one    = ct
ct     = ct*cd - st*sd

```

```

st = st*cd + one*sd
c
3 ratio = 6371.2/r
  rr = ratio*ratio
c
c computation of Schmidt quasi-normal coefficients p and x(=q)
c
p(1) = 1.0
p(3) = st
q(1) = 0.0
q(3) = ct
do 10 k=2,kmx
if (n.ge.m) go to 4
m = 0
n = n + 1
rr = rr*ratio
fn = n
gn = n - 1
4 fm = m
if (m.ne.n) go to 5
if (k.eq.3) go to 6
one = sqrt(1.0 - 0.5/fm)
j = k - n - 1
p(k) = one*st*p(j)
q(k) = one*(st*q(j) + ct*p(j))
cl(m) = cl(m-1)*cl(1) - sl(m-1)*sl(1)
sl(m) = sl(m-1)*cl(1) + cl(m-1)*sl(1)
go to 6
5 gmm = m*m
one = sqrt(fn*fn - gmm)
two = sqrt(gn*gn - gmm)/one
three = (fn + gn)/one
i = k - n
j = i - n + 1
p(k) = three*ct*p(i) - two*p(j)
q(k) = three*(ct*q(i) - st*p(i)) - two*q(j)
c
c synthesis of x, y and z in geocentric coordinates
c
6 lm = ll + 1
one = (tc*gh(lm) + t*gh(lm+nc))*rr
if (m.eq.0) go to 9
two = (tc*gh(lm+1) + t*gh(lm+nc+1))*rr
three = one*cl(m) + two*sl(m)
x = x + three*q(k)
z = z - (fn + 1.0)*three*p(k)
if (st.eq.0.0) go to 7
y = y + (one*sl(m) - two*cl(m))*fm*p(k)/st
go to 8
7 y = y + (one*sl(m) - two*cl(m))*q(k)*ct
8 l = l + 2
go to 10
9 x = x + one*q(k)
z = z - (fn + 1.0)*one*p(k)
l = l + 1
10 m = m + 1
c
c conversion to coordinate system specified by itype
c
one = x
x = x*cd + z*sd
z = z*cd - one*sd
f = sqrt(x*x + y*y + z*z)
c
return
c
c error return if date out of bounds
c
11 f = 1.0d8
write (6,961) date
961 format (' This subroutine will not work with a date of',
1 f9.3,'. Date must be in the range 1900.0.ge.date',
2 '.le.2015.0. On return f = 1.0d8., x = y = z = 0.')
return
end

```

Apéndice C

Código MATLAB para obtener la serie de datos de la base magnética remuestreada a 1 s.

```
%PROGRAMA PARA INTERPOLAR DATOS DE LA BASE MAGNETICA

format('long','g')
%Por pasos:
%Carga los datos del archivo "xxxxxxx.dnl"
% La estructura de los archivos DNL es la siguiente:
%
%072 000000 0001 417023
%072 000100 0002 417018
%072 000159 0003 417018
%072 000300 0004 417023
%072 000400 0005 417021      La primer columna corresponde al día Juliano
%072 000459 0006 417018      la segunda a la fracción en tiempo hhmmss
%072 000600 0007 417018      la tercera el numero de estación
%072 000700 0008 417016      la cuarta es el valor de campo magnético observado
%072 000759 0009 417021
%072 000900 0010 417020
%072 001000 0011 417023
load AL02076.dnl

%Lee por separado las columnas y les asigna nombres a cada una:
%DJ = Dia juliano
%HOURL= hora en formato HHMMSS
%ND= Número de dato
%MAG = Valor de campo magnetico
[DJ, HOUR, ND, MAG]= textread('AL02076.dnl', '%f %f %f %f');

%Dado que los datos estan espaciados a cada minuto a partir del primer
%minuto de cada dia creamos un vector que vaya espaciado a cada segundo es
%decir con 60 divisiones entre cada minuto.
hour=(1:1:1440);
hours=(1:0.016666666:1440);

%Definimos dos nuevas variables para llevar a cabo la interpolacion de los
%datos magneticos a cada segundo. En este caso la variable "y" contiene los
%nuevos valores interpolados para MAG.
MAGN=(MAG/10);
x=hours;
y=interp1(hour,MAGN,x);

%Salvamos el resultado interpolado en el archivo ""xxxxxxxint"" al tiempo
%que convertimos ese vector en un arreglo columna.
Y=y';
save('AL02076int', 'Y','-ascii')
```

Apéndice D

Flujo de trabajo para obtener la serie de corrección por efecto de rumbo de los datos magnéticos marinos, pasos:

- Obtener la serie de valores de campo principal o IGRF.
- Obtener la serie de valores para la variación diurna.
- Obtener el modelo de ajuste según el método de Bullard and Mason [1961].

a) El formato de archivo para los valores magnéticos marinos del círculo de calibración es:

```
45800.440 624.000 8.260 06/28/08 02:35:35.985 -86.3491710 26.3502770 -86.3463183 26.3502454 0 1 -86.3463181 26.3502565 2 -30.638 1 284.80
45800.190 633.000 8.420 06/28/08 02:35:37.988 -86.3492691 26.3502790 -86.3464164 26.3502465 0 1 -86.3464163 26.3502576 2 -30.273 1 284.80
45800.300 626.000 8.360 06/28/08 02:35:39.981 -86.3493704 26.3502811 -86.3465178 26.3502477 0 1 -86.3465177 26.3502588 2 -30.462 1 284.80
45800.390 642.000 8.740 06/28/08 02:35:41.983 -86.3494759 26.3502824 -86.3466233 26.3502489 0 1 -86.3466231 26.3502600 2 -30.832 1 284.80
45800.490 628.000 8.630 06/28/08 02:35:43.986 -86.3495811 26.3502825 -86.3467284 26.3502501 0 1 -86.3467282 26.3502612 2 -30.706 1 284.80
45800.560 631.000 8.210 06/28/08 02:35:45.979 -86.3496831 26.3502824 -86.3468303 26.3502512 0 1 -86.3468302 26.3502623 2 -30.459 1 284.80
45800.700 639.000 8.420 06/28/08 02:35:47.982 -86.3497834 26.3502822 -86.3469306 26.3502523 0 1 -86.3469305 26.3502634 2 -30.357 1 284.80
45800.700 637.000 8.360 06/28/08 02:35:49.985 -86.3498854 26.3502837 -86.3470326 26.3502534 0 1 -86.3470325 26.3502645 2 -30.495 1 284.80
45800.410 626.000 8.210 06/28/08 02:35:51.988 -86.3499902 26.3502845 -86.3471375 26.3502545 0 1 -86.3471373 26.3502656 2 -30.917 1 284.80
45800.490 635.000 8.520 06/28/08 02:35:53.981 -86.3500924 26.3502860 -86.3472398 26.3502556 0 1 -86.3472396 26.3502667 2 -30.675 1 284.80
45800.380 635.000 8.740 06/28/08 02:35:55.984 -86.3501947 26.3502866 -86.3473420 26.3502566 0 1 -86.3473419 26.3502677 2 -30.431 1 284.80
```

Respectivamente las columnas corresponden con el siguiente encabezado:

```
MAG1 SIGNAL1 DEPTH1(m) DATE TIME GPS_LON GPS_LAT SHIFT_LON SHIFT_LAT
ATARGETS NMAGS LON_MAG1 LAT_MAG1 GPS_QC GPS_HEIGHT LINE LAYBACK(m)
```

Este formato se adapta según lo especifica el código del programa del apéndice B para obtener la serie de valores de campo principal o IGRF.

b) La obtención de la serie de valores para la variación diurna se obtuvo según el método de Buchanan et al., [1996], que primero requiere que se obtenga una serie de tiempo que corresponda a la variación diurna para los días de la campaña oceanográfica ($f(t)$ en la sección IV.2.2).

c) Posteriormente se procede a obtener la serie de ajuste según Bullard and Mason [1961], (Figura 27). Para esto se restan las series de campo principal (IGRF) y de variación diurna al valor de campo observado de los datos magnéticos marinos obteniendo la anomalía $\Delta F_{obs} = F - IGRF - \Delta$ diurna.

También se obtiene el rumbo del Buque (en radianes) en cada momento en que el valor era leído. Y se obtiene la función de ajuste $f(\theta)$ donde θ es el rumbo, según el procedimiento de Bullard and Mason [1961]. Quedando:

$$\Delta F_{m_{rumbo}}(\theta) = 0.01791905 \cos(\theta) - 0.5271591 \cos^2(\theta) - 58.51121277$$