



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

“ANÁLISIS DE LAS ANOMALÍAS MAGNÉTICAS MARINAS EN EL LÍMITE SUR DE LA PLACA DE RIVERA, FRENTE A COLIMA, MÉXICO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(GEODINÁMICA Y GEOFÍSICA MARINA)

P R E S E N T A :

JUAN RAMÓN PELÁEZ GAVIRIA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS A. MORTERA GUTIÉRREZ

COMITÉ TUTORAL:

DR. PETER SCHAAF

DR. GERARDO SUÁREZ

DR. FRANCOIS MICHAUD

DR. WILLIAM L. BANDY

CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F., JUNIO, 2008

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos:

Al Dr. Carlos A. Mortera Gutiérrez por todo el apoyo académico, moral y mental brindado al fungir como tutor y director durante todo el transcurso del postgrado, por la oportunidad que me ha brindado no solo por la contribución en mi crecimiento profesional, si no también personal.

Al Dr. William L. Bandy por toda su colaboración en la parte académica, por todos los aportes y comentarios realizados durante todo el transcurso del postgrado y por revisar la tesis como sinodal.

Al Dr. Francois Michaud, por facilitar el conjunto de datos batimétricos de alta resolución para el área de estudio (compilación de datos de batimetría multihaz).

A los Dr. Peter Schaaf, Dr. Gerardo Suárez, Dr. Francois Michaud, Dr. William L. Bandy. Por hacer parte del comité evaluador como sinodales de mi tesis.

Al Dr. Peter Schaaf, a la Dra. Margarita López y al personal del Laboratorio de Geocronología del CICESE que realizaron los fechamientos de la muestra.

A la Coordinación Académica de Buques Oceanográficos (CABO), por el tiempo de buque que asignaron para realizar las campañas MARTIC04 y MARTIC05.

A todo el personal del B/O El Puma y de la base de Mazatlán, por todo su apoyo y su amistad en los momentos en que

Al ingeniero Esteban Hernández y al personal del área de geomagnetismo del Instituto de Geofísica y del Observatorio Geomagnético de Teoloyucan de la UNAM, por el apoyo prestado al establecer las bases geomagnéticas temporales, adquirir, monitorear, descargar y entregar los datos de campo magnético total correspondientes.

A la DGAPA-PAPIT, por las becas otorgadas dentro de los proyectos IN117305-2 y IN104707-3.

Al Dr. Carlos Valdés González, al proyecto externo P390, por la asignación de una beca que me permitió realizar parte de los estudios de maestría.

Al personal administrativo del instituto de geofísica y al consejo interno.

Al personal del posgrado de Ciencias de la Tierra.

A la Dra. Elva Escobar Briones por su apoyo, enseñanzas y colaboración.

A la Dra. Glicina Ortiz por su apoyo, enseñanzas y colaboración.

A mi familia y amigos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	III
ABSTRACT.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
2.1. Marco geológico-tectónico regional	5
2.2. Hipótesis anteriores	8
2.3. Datos preexistentes.....	16
3. METODOLOGÍA	25
3.1. Datos	25
3.2. Cálculo de las Anomalías Magnéticas.....	35
3.3. Procesamiento de los datos magnéticos	38
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	48
4.1. Resultados.....	48
4.2. Interpretación de los resultados	59
4.3. Síntesis de los resultados.....	72
5. DISCUSIÓN	76
5.1. Evolución tectónica del límite sur de la Placa de Rivera.....	76
5.2. Entre 3.0 Ma – 1.77 Ma.....	78
5.3. Entre 1.77 Ma – 1.5 Ma.....	82

5.4. Entre 1.5 Ma – 0.0 Ma.....	83
6. CONCLUSIONES	91
REFERENCIAS.....	92
ANEXO 1. PROCEDIMIENTO DETALLADO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CORRECCIONES MAGNÉTICAS DIURNAS Y POR RUMBO.	98
Correcciones diurnas.....	98
Correcciones por rumbo.....	107
ANEXO 2. MECANISMOS FOCALES.....	113
ANEXO 3. DRAGADOS, MUESTREO Y FECHAMIENTO	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa tectónico de placas del pacífico Mexicano (modificada de “Plate Boundary Model” PB2002 de <i>Bird</i> [2003]). Área de estudio en recuadro rojo.....	2
Figura 2. Elementos morfotectónicos del área de estudio y sus alrededores. Las Abreviaciones son: PAC = Placa Pacífico; NAM = Placa Norte Americana; COC = Placa Cocos; RIV = Placa Rivera; MR = Mathematician Ridge; MoT = Moctezuma Trough; EGG = El Gordo Graben; SCG = Southern Colima Graben; JB = Jalisco Bolck; TT = Tamayo Transform; RT = Rivera Transform; PRT = Paleo Rivera Transform; MSS = Moctezuma Spreading Segment; EPR-PRS = East Pacific Rise Pacific-Rivera Segment; EPR-PCS = East Pacific Rise Pacific-Cocos Segment; MAT = Middle American Trench. Estructuras volcánicas (manchas negras), límites activos (líneas gruesas) y límites inactivos (líneas delgadas). Modificada de <i>DeMets and Traylen</i> [2000].....	6
Figura 3. Diagramas de la evolución tectónica de la EPR de <i>Mammerickx and Klitgord</i> [1982] para el periodo entre 6.5 Ma y los 3.5 Ma.	9
Figura 4. Diagramas de la evolución tectónica de la EPR-PCS de <i>Bandy and Hilde</i> [2000] para el periodo entre 1.7 Ma y el presente. Las líneas delgadas están identificadas con los nombres de las anomalías magnéticas marinas. Las Abreviaciones son: MiT = Michoacan Trough; OTPF = Outer tectonic Psuedofault; ITPF = Inner Tectonic Pseudofault. Ver Figura 2 para las demás abreviaciones.....	10
Figura 5. Esquema de la evolución tectónica de la EPR-PCS de <i>Michaud et al.</i> [2001] para el periodo entre 2 Ma y el presente.....	11
Figura 6. Diagramas de la evolución tectónica de la EPR de <i>Lonsdale</i> [1995] para el periodo entre 5 Ma y el presente.....	12
Figura 7. Diferentes hipótesis respecto a la posición, dirección y tipo de límite entre las placas de RIV y COC en el presente. A) Límite sinestral orientado SW-NE, planteado por <i>Nixon</i> [1982] y seguido por <i>Eissler and McNally</i> [1984] y <i>Mammerickx and Carmichael</i> [1989]. B) Límite divergente con movimientos diferenciales orientado SW-NE planteado por <i>Bandy</i> [1992] y seguido por <i>Bandy et al.</i> [1995], <i>Kostoglodov and</i>	

<i>Bandy</i> [1995], <i>Bandy et al.</i> [1998], <i>Bandy et al.</i> [2000] y <i>Serrato-Días et al.</i> [2004]. C) Límite difuso compresional planteado por <i>DeMets and Stein</i> [1990] y seguido por <i>DeMets and Wilson</i> [1997]. D). zona de deformación difusa asociada al límite entre las placas PAC, COC y NAM planteado por <i>Michaud et al.</i> [1997].	14
Figura 8. Localización y mecanismos focales de los principales grandes sismos cerca del límite entre las placas RIV y COC Tomada de <i>Suárez et al.</i> [1999].	15
Figura 9. Cobertura de datos batimétricos. A) Datos totales desde 1958 hasta el presente, 106 cruceros. B) Datos desde 1986 hasta el presente, 44 cruceros. C) Datos desde 1992 hasta el presente, 19 cruceros.	17
Figura 10. Cobertura de datos gravimétricos. A) Datos totales desde 1958 hasta el presente, 38 cruceros. B) Datos desde 1986 hasta el presente, 18 cruceros. C) Datos desde 1992 hasta el presente, 2 cruceros.	17
Figura 11. Cobertura de datos magnetométricos. A) Datos totales desde 1958 hasta el presente, 62 cruceros. B) Datos desde 1986, 19 cruceros. C) Datos desde 1992 hasta el presente, 6 cruceros.	17
Figura 12. Mapas desarrollados con todos los datos disponibles en GEODAS. A) Batimetría. B) Gravimetría. C) Magnetometría.	18
Figura 13. Mapas del relieve del piso oceánico a partir de datos de batimetría multihaz y altimetría satelital. A) cobertura de datos multibeam disponible en el “ridge project”. B) Morfología realizada mediante datos batimétricos complementarios y datos de alta resolución disponibles en el “ridge project”. C) Cobertura y morfología asociada de datos batimétricos colectados mediante equipos multibeam disponibles en “NOAA Multibeam Bathymetry”. D) morfología realizada mediante los datos de altimetría satelital y batimetría de alta resolución disponibles en “Satellite Geodesy”.	20
Figura 14. Mapas batimétricos. A) <i>Michaud et al.</i> [2000]. B) <i>Bandy et al.</i> [2005]. C) <i>Serrato-Días et al.</i> [2004].	21
Figura 15. Mapas gravimétricos. A) Mapa de la anomalía de aire libre de <i>Serrato-Días et al.</i> [2004]. B) Mapa de anomalías gravimétricas de <i>Michaud et al.</i> [2000]. C) Mapa de anomalías gravimétricas (aire libre mar afuera y Bouguer tierra adentro) de <i>Bandy and Hilde</i> [2000].	22

Figura 16. Mapas magnetométricos. A) Anomalías magnéticas marinas de <i>DeMets and Traylen</i> [2000]. B) Anomalías magnéticas marinas de <i>DeMets and Wilson</i> [1997]. C) Mapa de anomalías magnéticas de <i>Bandy and Hilde</i> [2000]. D) Mapa de anomalías magnéticas de <i>Michaud et al.</i> [2000].	23
Figura 17. Mapa del relieve del piso oceánico en la región de la intersección del segmento de la dorsal EPR-PCS con la transformada RT y la trinchera MAT. Datos multihaz fueron compilados por el Dr. F. Michaud (datos no publicados, 2007). Las zonas en color azul señalan las mayores profundidades.	24
Figura 18. Mapa de los transectos magnéticos útiles de los cruceros MARTIC04 (azul) y MARTIC05 (verde). Los intentos de dragados (amarillo) y el sitio (en rojo) donde se logró sacar material de fondo. Batimetría obtenida de GeoMapApp (disponible en http://www.geomapapp.org/)	27
Figura 19. Trayectorias circulares usadas para las correcciones por rumbo de para: A) MARTIC04 y B) MARTIC05.	28
Figura 20. Mapa esquemático de la posición de las estaciones temporales base, sus áreas de influencia y su relación geográfica con el observatorio magnético de Teoloyucan y con el área de estudio (polígono).	30
Figura 21. Mapas esquemáticos de las áreas de seguridad respecto a perturbaciones magnéticas para las estaciones base. A). Base magnética temporal en Manzanillo, B): Base magnética temporal en Chamela.	30
Figura 22. Grafica del campo magnético total (F) para la estación base de Manzanillo durante el crucero MARTIC04 (del DJ-302 al DJ-315).	31
Figura 23. Grafica del campo magnético total (F) para la estación base de Chamela durante el crucero MARTIC05 (del DJ-20 al DJ-31).	32
Figura 24. Grafica del índice DST ecuatorial. A) para los meses de octubre y noviembre del 2004. B) para el periodo de días del Crucero MARTIC04. Datos tomados del centro de datos mundiales (WDC) magnéticos de Kyoto. El tiempo está en días (UT).	33
Figura 25. Gráfica del índice DST ecuatorial, A) para el mes de enero del 2006. B) para el periodo de días del Crucero MARTIC05. Datos tomados del centro de datos mundiales (WDC) magnéticos de Kyoto. El tiempo está en días (UT).	33

Figura 26. Grafica del campo magnético total (F) para el observatorio magnético de Teoloyucan durante el crucero MARTIC04 (del DJ-303 al D-J309). Datos sin influencia de tormenta magnética.....	34
Figura 27. Gráfica del campo magnético total (F) de la estación base de Manzanillo, durante el crucero MARTIC04, remuestreados cada 2 segundos.....	39
Figura 28. Grafica del campo magnético total (F) de la estación base de Chamela durante el crucero MARTIC05, remuestreados cada 2 segundos.....	39
Figura 29. Graficas de la variación diurna relativa para los datos de la estación base de Manzanillo durante el crucero MARTIC04. A) Establecimiento del valor base para la variación diurna de la estación base de Manzanillo. B) Datos del DTS para el mismo periodo de tiempo.	40
Figura 30. Graficas de la variación diurna relativa para los datos de la estación base de Chamela durante el crucero MARTIC05. A) Establecimiento del valor base para la variación diurna de la estación base de Chamela. B) Datos del DTS para el mismo periodo de tiempo.	41
Figura 31. Grafica del [campo magnético total (F)] vs. [dirección del magnetómetro], en el círculo de calibración, para MARTIC05.	42
Figura 32. Grafica del [campo magnético total (F)] vs. [dirección del magnetómetro], en el círculo de calibración, para MARTIC04.	42
Figura 33. Grafica del [campo magnético total (F), menos (IGRF), menos (Δ diurna)] vs. [dirección del magnetómetro] en el círculo de calibración para MARTIC05. Ajuste realizado mediante e método de <i>Bullard and Mason</i> [1961].	43
Figura 34. Grafica del [campo magnético total (F), menos (IGRF), menos (Δ diurna)] vs. [dirección del magnetómetro] en el círculo de calibración para MARTIC04. Ajuste realizado mediante e método de <i>Bullard and Mason</i> [1961].	44
Figura 35. Curva normalizada que muestra la ecuación de ajuste obtenida para la corrección por rumbo según <i>Bullard and Manson</i> [1961], normalizada a su valor máximo para MARTIC05.....	46
Figura 36. Curva que muestra la ecuación de ajuste obtenida para la corrección por rumbo según <i>Bullard and Manson</i> [1961], normalizada a su valor máximo para MARTIC04.	47

Figura 37. Mapa de la morfología de la zona de estudio realizado mediante un manejo grafico especial, a partir de los datos batimétricos de alta resolución compilados y facilitados por el Dr. F. Michaud (datos no publicados, 2007). Los intentos de dragados (azul) y el sitio (en rojo) donde se logro sacar material de fondo.	49
Figura 38. Mapa de la morfología de la zona de estudio realizado mediante un manejo grafico especial a partir de los datos batimétricos de alta resolución compilados por el Dr. F. Michaud (datos no publicados, 2007) y los datos de altimetría satelital disponibles en http://topex.ucsd.edu/WWW_html/mar_topo.html , integrados de tal forma que se mantengan las dos resoluciones originales.....	50
Figura 39. Mecanismos Focales seleccionados para la zona de estudio ilustrando su relación con la morfología. (Mecanismos Focales disponibles en el sitio http://neic.usgs.gov/neis/sopar/ del “U.S. Geological Survey” (USGS) y en el sitio http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html de la Universidad de HARVARD).....	52
Figura 40. Mapa magnetométrico para la zona de estudio con los respectivos transectos de adquisición de los nuevos datos.	53
Figura 41. Localización del perfil A-A', que se usará para la comparación de las anomalías con el modelo teórico, y de la muestra fechada en el mapa magnetométrico para la zona de estudio.	55
Figura 42. Comparación entre la magnetometría y batimetría reales para el perfil A-A' contra el modelo teórico de las anomalías magnéticas a una tasa HSR de 44 mm/a... 57	57
Figura 43. Comparación entre la magnetometría y batimetría reales para el perfil A-A' contra el modelo teórico de las anomalías magnéticas a una tasa HSR de 63 mm/a... 58	58
Figura 44. Estructuras morfotectónicas principales y su relación con la morfología. Las abreviaciones son: RFZ = Zona de Fractura de Rivera; MSS-PSF-E = Pseudo-Falla Externa del MSS; MSS-PSF-I = Pseudo-Falla Interna del MSS; EPR-P1 y EPR-P2: propagadores 1 y 2. Ver figura 2 para las demás abreviaciones.	60
Figura 45. Esquematación de los diferentes tipos de zonas tectónicas presentes en el área de estudio y las estructuras principales. (A) Zonas de generación de corteza oceánica reciente no deformadas; (B) Zona de corteza oceánica deformada incipientemente; (C) Zona de posible generación de corteza oceánica reciente no deformada; (D-1) Depresión relacionada con la trinchera con cobertura de sedimentos	

relativamente amplia sin presencia de estructuras que sobresalgan; (D-2) Depresión relacionada con la trinchera con una cobertura de sedimentos estrecha, cortada estructuras que sobresalen de la cobertura sedimentaria; (E) Depresión relacionada con el EGG; (F) Depresiones relacionadas con los eventos de propagación; (G) Zonas de alta deformación de corteza oceánica relacionada con las zonas OSS; (H) Corteza continental: plataforma y talud continental. Ver Figuras 2 y 4 para las demás abreviaciones.	64
Figura 46. Estructuras principales asociadas con el mapa magnetométrico. Ver Figuras 2 y 44 para las abreviaciones.	66
Figura 47. Mapa magnetométrico con las posibles anomalías magnéticas a identificar. (1C y 2D) anomalías magnéticas extrañas. (Líneas en negro: anomalías magnéticas definidas por interpretaciones previas; líneas en verde: anomalías magnéticas identificadas con claridad a partir de los datos de este estudio; líneas de colores amarillo y naranja: posibles anomalías y/o posibles variantes de ciertas anomalías; contornos en violeta y azul: anomalías magnéticas puntuales aparentemente aisladas y no relacionadas directamente con el esparcimiento oceánico)	69
Figura 48. Mapa de anomalías magnéticas relacionadas con las con las estructuras principales. Las anomalías magnéticas marinas perfectamente determinadas están identificadas con sus nombres. Ver Figuras 2 y 44 para las abreviaciones.	71
Figura 49. Esquema de la interpretación de los mapas de morfología y magnetometría, donde se muestran las principales estructuras morfotectónicas y su relación con las anomalías magnéticas perfectamente determinadas (identificadas con sus nombres). Ver Figuras 2, 44 y 45 para las abreviaciones.	73
Figura 50. Esquemización de los diferentes tipos de zonas tectónicas presentes en la zona de estudio superpuesto a las principales estructuras morfotectónicas, las anomalías magnéticas perfectamente identificadas (identificadas con sus nombres) y los dos conjuntos de anomalías extrañas. Ver Figuras 2, 44 y 45 para las abreviaciones.	75
Figura 51. Diagrama tectónico de la zona de estudio de <i>Lonsdale</i> [1995] para los 3Ma. Área de estudio en recuadro rojo.	77

Figura 52. Esquema inicial de la evolución tectónica a los 3 Ma para la zona de estudio que integra la interpretación de Lonsdale [1995] y los resultados de este estudio.	78
Figura 53. Esquema de la evolución tectónica para los 1.77 Ma.	79
Figura 54. Diagramas de la evolución tectónica del propagador del EPR. El esquema muestra como la zona de fractura de O’Gorman es separada por el propagador desde los 2.5 Ma, modificada de <i>Madsen et al.</i> [1992].	80
Figura 55. Esquema de la evolución tectónica para los 1.5 Ma.	83
Figura 56. Esquema de la evolución tectónica para 1 Ma.	84
Figura 57. Esquema de la evolución tectónica para los 0.8 Ma.	86
Figura 58. Diagramas evolutivos del modelo de <i>Wilson</i> [1990] de traslape de centros de esparcimiento con abandono cíclico de propagadores (“Overlapping Rift Propagation with Cyclic Rift failure”).	87
Figura 59. Esquema de la evolución tectónica para los 0.4 Ma.	89
Figura 60. Esquema de la evolución tectónica para los 0 Ma.	90
Figura 61. Grafica del campo magnético total (F) de la estación Base de Manzanillo de DJ-302 al D-J311 correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC04. Datos sin influencia de tormenta magnética.	98
Figura 62. Grafica del campo magnético total (F), comparando los datos del observatorio magnético de Teoloyucan contra los datos de la estación base de Manzanillo correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC04.	99
Figura 63. Grafica que muestra las diferencias en magnitud del campo magnético total (F), entre los datos de la estación magnética base de Manzanillo (en azul), y los datos del observatorio geomagnético de Teoloyucan (en rosa).	100
Figura 64. Grafica del campo magnético total (F), de la estación base de Manzanillo del DJ-302 al DJ-311, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC04, definida totalmente mediante datos del observatorio geomagnético de Teoloyucan.	101
Figura 65. Grafica del campo magnético total (F), de la estación base de Manzanillo, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC04, reinterpelados a 716 puntos para poder eliminar los efectos en días con perturbaciones	

antrópicas (DJ 310 y 311) y mucha parte de las altas frecuencias que no son de nuestro interés.	102
Figura 66. Grafica del campo magnético total (F), de la estación base de Manzanillo, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC04, filtradas las altas frecuencias.	102
Figura 67. Grafica del campo magnético total (F), menos los datos teóricos IGRF de la estación base de Manzanillo. Correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC04.....	103
Figura 68. Reducción al mínimo de los datos y establecimiento de la línea base (línea roja) para la variación diurna para el crucero MARTIC04	104
Figura 69. Grafica del campo magnético total (F) de la estación base de Chamela, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC05, reinterpelados a 867 puntos para poder eliminar los efectos en días con perturbaciones y mucha parte de las altas frecuencias que no son de nuestro interés.....	105
Figura 70. Grafica del campo magnético total (F) de la estación base de Chamela, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC05, filtradas las altas frecuencias.	106
Figura 71. Grafica del campo magnético total (F), menos los datos teóricos IGRF de la estación base de Chamela, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC05.....	106
Figura 72. Reducción al mínimo de los datos y establecimiento de la línea base (línea roja) para la variación diurna, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC05.....	107
Figura 73. Grafica del [campo magnético total (F), menos los datos teóricos (IGRF)] vs. [dirección del magnetómetro], en el círculo de calibración para MARTIC04	108
Figura 74. Grafica de los [datos magnéticos (F), menos los datos teóricos (IGRF), menos la variación diurna (Δ diurna)] vs. [dirección del magnetómetro], en el círculo de calibración para MARTIC04	109
Figura 75. Curva (línea roja) que muestra la ecuación de ajuste obtenida para la corrección por rumbo según <i>Bullard and Mason</i> [1961] para MARTIC04.	110

Figura 76. Grafica del [campo magnético total (F), menos los datos teóricos (IGRF)] vs. (dirección del magnetómetro), en el círculo de calibración para MARTIC05.....	111
Figura 77. Grafica del [campo magnético total (F), menos los datos teóricos (IGRF), menos la variación diurna (Δ diurna)] vs. [dirección del magnetómetro], en el círculo de calibración para MARTIC05.	112
Figura 78. Curva (línea roja) que muestra la ecuación de ajuste obtenida para la corrección por rumbo según <i>Bullard and Mason</i> [1961] para MARTIC05.	112
Figura 79. Mapa de la localización de los sismos. Los datos de cada una de las bases de datos y los datos que al final fueron utilizados.	117
Figura 80. Draga de arrastre para rocas usada durante el crucero MARTIC04.	120
Figura 81. Zonas en las que se realizaron los intentos (en azul) de dragados para los cruceros MARTIC04 y MARTIC05, más el resultado del fechamiento de la muestra en el sitio (en rojo) donde se logro sacar material de fondo.....	122

RESUMEN

El límite entre las placas de Rivera, Cocos, Pacífico y Norte América, ha estado influenciado por la evolución del segmento Pacífico-Cocos (PCS), de la dorsal “East Pacific Rise” (EPR). Varios investigadores difieren en la historia de la evolución reciente de este segmento en relación al límite sur de la Placa de Rivera, implicando que este límite aún no se haya determinado claramente. Esta discrepancia se ha mantenido vigente debido a la poca resolución espacial de las anomalías magnéticas y de la batimetría multihaz en la región, sumado a la alta complejidad del relieve oceánico y sus anomalías magnéticas. Para entender la compleja tectónica del área, se llevó a cabo un minucioso mapeo de alta resolución espacial de las anomalías magnéticas en dos campañas de geofísica marina (MARTIC-04 y MARTIC-05) con el B/O EL PUMA en 2004 y 2006. Los datos magnéticos fueron corregidos por los efectos de las variaciones diurnas del campo geomagnético y por el rumbo del buque, y reducidos a valores de la anomalía magnética de la corteza oceánica. Además de la ubicación actual de la dorsal EPR-PCS, los nuevos datos de anomalías magnéticas complementados con datos batimétricos multihaz previos, revelan varias posiciones de este segmento. Estos datos también definen claramente la deformación tectónica del área de estudio y permiten plantear una clara evolución del EPR-PCS desde los 3 Ma. Específicamente este segmento se comportó como un propagador que avanzó y retrocedió en interacción con la Transformada de Rivera, afectando el límite entre las placas Rivera y Cocos frente a la zona de subducción de Jalisco, donde se evidencia una zona de deformación dominada por esfuerzos transcurrentes, en la cual no existe un límite abrupto claramente definido.

ABSTRACT

The boundary between the Rivera, Cocos, Pacific and North American plates off Manzanillo has been highly influenced by the motion of the Pacific-Cocos Segment of the East Pacific Rise (EPR-PCS). Several researchers differ in the recent history of the northern tip of the EPR-PCS in relation to the southern boundary of the Rivera Plate, implying that this limit has not yet been clearly identified. This situation has been kept alive due to the low spatial resolution of marine magnetic data and multibeam bathymetric data in the region, along with the high complexity of the relief of the ocean floor and its magnetic anomalies. To understand the complex tectonics of this area we conducted, aboard the B/O "El Puma", detailed marine magnetic mapping during two marine geophysical campaigns (MARTIC-04 and MARTIC-05) in 2004 and 2006. The magnetic data were reduced to anomalies by removing the main field, the effects of daily variation of the geomagnetic field and the effects of the ship heading. In addition to the current location of the dorsal EPR-PCS, the new magnetic anomaly data supplemented by previously multibeam bathymetric data reveals several relict positions of this segment. Further these data clearly define the detailed tectonic deformation and a clear evolution of the EPR-PCS since 3 Ma. Specifically, this segment was a propagator that was significantly modified by the formation of the Rivera Transform, and it modified the boundary between the Rivera and Cocos plates, located in front of the Jalisco subduction zone, which appears as deformation zone dominated by shear stresses, in which there is no clearly defined limit.

1. INTRODUCCIÓN

La interacción entre dorsales oceánicas, puntos triples, límites de placas y plumas del manto contra las zonas de subducción es un fenómeno común en los márgenes del Pacífico. Esta interacción deja marcas en el registro geológico de los márgenes continentales, que van a depender en gran parte del ángulo con el que dichas estructuras llegan a la subducción, si estas son lineales o puntuales o si estas son activas o inactivas, etc. [e.g., *Atwater*, 1989; *Atwater and Stock*, 1998; *Nixon*, 1982; *Cloos*, 1993; *Norton*, 1995]. Comúnmente, el registro geológico en el margen puede presentar: migración del magmatismo del arco, etapas con ausencia del magmatismo, magmatismo adakítico, flujos de basaltos, cambios del régimen tectónico, como etapas de levantamiento, compresión y extensión relacionadas en algunos escenarios con movimientos laterales y rotacionales de los bloques corticales [e.g., *Cloos*, 1993; *DeMets et al.*, 1987; *Bohannon and Parsons*, 1995; *Gutscher et al.*, 1999; *Calmus*, 1999; *Stock and Lee*, 1994]. Algunos de estos fenómenos observables en el registro geológico se han explicado como el resultado de los siguientes factores: horizontalización progresiva de la placa que subduce acompañada por “slab windows” [e.g., *Gorbatov and Fukao*, 2005; *Michaud et al.*, 2006; *Van Der Lee and Nolet*, 1997; *Johnston and Thorkelson*, 1997], “roll back” de la zona de subducción [e.g., *Atwater*, 1989; *Coney*, 1989], migración de las isothermas [e.g., *Calmus*, 1999; *Bohannon and Parsons*, 1995] disminución en la velocidad de la convergencia [e.g., *Atwater*, 1989; *Lonsdale*, 1991; *Lonsdale*, 1995] y erosión por subducción [e.g., *Vannucchi et al.*, 2004; *Clift and Vannucchi*, 2004].*

La colisión de la dorsal “East Pacific Rise” (EPR) durante la historia geológica contra la Placa de Norte América (NAM), se ha registrado en el margen continental desde Alaska hasta México (Figura 1), terminando en la migración compleja del posible punto triple o

Esta tesis se realizó siguiendo el estilo de referencias del Journal of Geophysical Research.

cuádruple entre las placas de Rivera (RIV), Cocos (COC), Pacífico (PAC) y (NAM). Este punto en su etapa presente es un laboratorio natural que permite observar los procesos que suceden cuando una dorsal oceánica se acerca a una zona de subducción. Para entender la evolución y el régimen tectónico de esta área es de suma importancia obtener datos de sus características geológicas, geofísicas y tectónicas que puedan aportar una clara imagen de la evolución de la dorsal oceánica al acercarse a la zona de subducción.

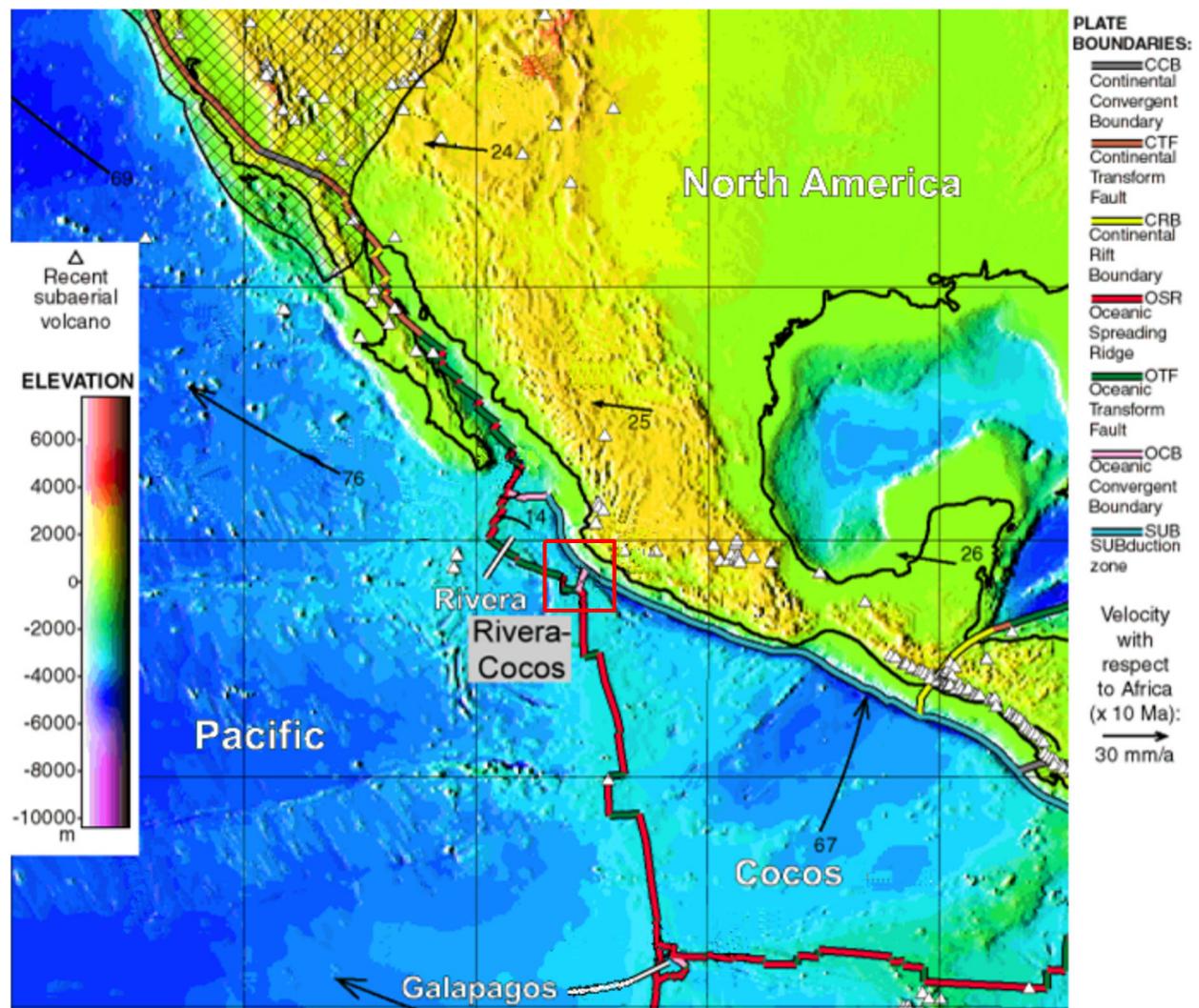


Figura 1. Mapa tectónico de placas del pacífico Mexicano (modificada de "Plate Boundary Model" PB2002 de Bird [2003]). Área de estudio en recuadro rojo.

La geología y tectónica del área de interés es amplia, compleja y está altamente perturbada, y a su vez está directamente relacionada con la intersección del segmento de la dorsal “East Pacific Rise, Pacific-Cocos Segment” (EPR-PCS) con la Transformada de Rivera (“Rivera Transform” o RT) y con la trinchera “Mid American Trench” (MAT), situación que demanda un mejor reconocimiento geofísico marino, para entender la tectónica de la zona. Las más recientes investigaciones se han encaminado a la identificación morfotectónica del piso oceánico a partir de datos batimétricos multihaz que aún no cubren el 100% del piso oceánico en el área de estudio. Sin embargo, es incierto, el momento y la posición donde terminó la propagación del segmento de la dorsal EPR-PCS, debido a que los lineamientos magnéticos en la zona están altamente perturbados, no son fáciles de correlacionar y a la escasez de datos magnéticos marinos y batimétricos multihaz frente a las costas de Colima y Jalisco.

Esta investigación pretende resolver en el área de estudio (Figura 1) varios interrogantes sobre las características tectónicas de la zona y las estructuras involucradas, y así mejorar e incrementar el conocimiento de la tectónica del Pacífico Mexicano, teniendo como objetivos principales: determinar la ubicación y evolución geológica de la dorsal EPR-PCS, definir el límite entre las placas NAM, PAC, RIV y COC, e identificar las estructuras morfotectónicas presentes frente a la zona de subducción de Colima y Jalisco.

Para lograr estos objetivos se recolectaron nuevos datos magnéticos marinos con una alta resolución espacial y muestras del fondo oceánico en dos campañas oceanográficas (MARTIC-04 y MARTIC-05) a bordo del B/O El Puma en el área entre 17°N y 20°N y entre la dorsal EPR-PCS y la trinchera MAT, complementados con batimetría monohaz y multihaz. Contar con nuevos datos magnéticos marinos de alta resolución espacial y que cubren la totalidad del área de estudio, permite generar nuevos mapas del campo magnético más precisos y resolutivos. Con estos nuevos

mapas es posible realizar un análisis más acertado de de los lineamientos magnéticos marinos y su relación con el relieve del piso oceánico.

Para el desarrollo de esta investigación, se definieron metas que constituyen el marco metodológico. El proceso se inicia con la construcción de los nuevos mapas del campo magnético en el área de estudio, que permiten determinar las edades de la litósfera oceánica, por medio de la modelación de los lineamientos magnéticos, controlados con nuevos fechamientos de muestras del fondo oceánico. En cuanto al relieve del piso oceánico se integró una base de datos batimétricos multihaz existentes, elaborándose un nuevo mapa que se correlaciona con los mapas magnetométricos en el área de estudio.

2. ANTECEDENTES

2.1. Marco geológico-tectónico regional

El área de estudio se ubica en el Pacífico Mexicano frente a los estados de Jalisco y Colima, y se enmarca tectónicamente entre las placas NAM, COC, PAC y RIV (Figura 1). La placa RIV limita: al oriente con la placa NAM, con la trinchera MAT; al occidente con la placa PAC, con el segmento de la dorsal “East Pacific Rise, Pacific-Rivera Segment” (EPR-PRS); al norte con la Transformada de Tamayo (“Tamayo Transform” o TT) y al sur con la transformada RT.

El límite SE de la placa RIV, está conformado posiblemente por un punto triple o cuádruple desde un punto de vista global (Figura 1), sin embargo desde un punto de vista regional en esta zona posiblemente se presentan límites difusos y complejos entre las placas de NAM, COC, PAC y RIV.

La placa RIV es una placa oceánica de menor dimensión que las placas que la rodean, con una compleja historia cinemática, una significativa deformación interna y una amplia distribución de la sismicidad (Figura 2). Numerosos estudios se han realizado para resolver el movimiento, rotación y deformación de la placa RIV [e.g., *Klitgord and Mammerickx*, 1982; *Eissler and McNally*, 1984; *Bourgeois et al.*, 1988; *DeMets and Stein*, 1990; *Bandy and Pardo*, 1994; *Lonsdale*, 1995; *DeMets and Wilson*, 1997; *Bandy et al.*, 1998], usando principalmente el relieve batimétrico y los lineamientos magnéticos del esparcimiento oceánico. Estos estudios han determinado de manera general que la convergencia entre la placas PAC y RIV ha tenido velocidades entre los 20 y los 70 mm/año desde hace 1 Ma, pero es de anotar que aún hay controversia respecto a ciertos límites de la placa y a la deformación intraplaca.

Varios autores [DeMets and Stein, 1990; Lonsdale, 1995; Bandy and Hilde, 2000] sugieren que la velocidad y dirección del movimiento de la placa RIV ha cambiado en el tiempo. Inicialmente a los 7 Ma hubo una reducción de la velocidad de manera gradual, posteriormente un descenso después de los 3.6 Ma, para luego en el último millón de años recuperar algo de su velocidad [DeMets and Traylen, 2000]. Los cambios en la dirección y velocidad del movimiento son aún motivo de polémica entre los autores que han estudiado de manera detallada el movimiento de la placa RIV. Pero es claro, que consecuencia de los cambios en la velocidad y dirección del movimiento de la placa RIV las estructuras registran el régimen de deformación que posee dicha placa.

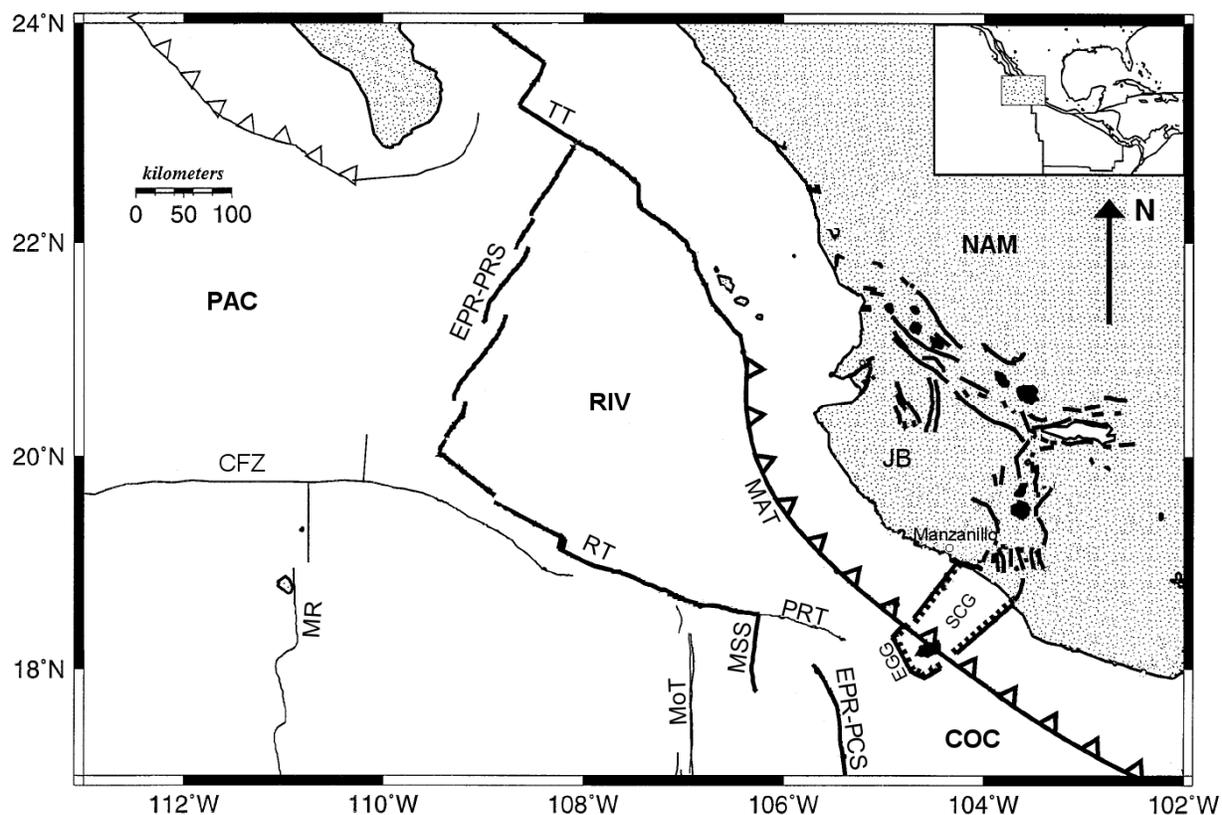


Figura 2. Elementos morfotectónicos del área de estudio y sus alrededores. Las Abreviaciones son: PAC = Placa Pacífico; NAM = Placa Norte Americana; COC = Placa Cocos; RIV = Placa Rivera; MR = Mathematician Ridge; MoT = Moctezuma Trough; EGG = El Gordo Graben; SCG = Southern Colima Graben; JB = Jalisco Bolck; TT = Tamayo Transform; RT = Rivera Transform; PRT = Paleo Rivera Transform; MSS = Moctezuma Spreading Segment; EPR-PRS = East Pacific Rise Pacific-Rivera Segment; EPR-PCS = East Pacific Rise Pacific-Cocos Segment; MAT = Middle American Trench. Estructuras

volcánicas (manchas negras), límites activos (líneas gruesas) y límites inactivos (líneas delgadas). Modificada de *DeMets and Traylen* [2000].

La litosfera de la placa RIV bajo la placa NAM subduce a un ángulo de 45° [*Pardo and Suárez*, 1995]. Las evidencias apuntan a que es más factible que el movimiento de la placa RIV sea producto de la fuerza principal por el efecto gravitacional de la litosfera subducida “slab”, ya que las fuerzas de empuje producidas por el esparcimiento del suelo oceánico en el segmento de la dorsal EPR-PRS no son lo suficientemente grandes [*DeMets and Traylen*, 2000].

Entre los límites de la placa RIV que poseen mayor vulcanismo asociado, está la dorsal EPR-PRS que presenta una tasa de esparcimiento (~ 70 mm/año), su parte central es estrecha y alta, con bastante generación de material basáltico típico “Mid Ocean Ridge Basalts” (MORB), caracterizado por pulsos de grandes derrames básicos, con coladas de lava, campos de lavas almohadilladas “pillow lavas”, y enjambres de diques basálticos [e.g., *Moss and Scott*, 1996; *Batiza and White*, 2000]. En varias regiones se han visto diferencias significativas en el vulcanismo que está asociado a discontinuidades de la dorsal EPR-PRS, como en las Zonas de Traslape de Centros de Esparcimiento (“overlapping spreading segments” o OSS) y otras discontinuidades menores, ya que el vulcanismo en la dorsal EPR-PRS, es principalmente fisural y por ende depende del volumen, de la velocidad de ascenso del magma y de tipo de estructuras [*Kearey and Vine*, 1996].

Asociado al ambiente tectónico regional que rodea la placa RIV, se tiene prácticamente no hay una cuenca de ante arco (“forearc basin”) asociada a la zona de subducción en Jalisco [*Richter and Rosas-Elguera*, 2001]; que la trinchera forma una curva convexa hacia la subducción; que el magmatismo y vulcanismo en el margen continental de Jalisco no tiene firma geoquímica característica, mostrando una amplia variedad de productos ígneos sobre la placa NAM, los que a su vez, están asociados a la gran actividad geodinámica de la zona desde los últimos 52 Ma. Entre estos se han identificado series de rocas con composición tipo: Alcalina Intraplaca (IA) con composiciones similares a los Basaltos de Isla Oceánica (OIB); calcoalcalina y series

potásicas, que incluyen magmas hidratados como lamprófidos y magmas secos como shoshonitas y absarokitas [*Richter and Rosas-Elguera, 2001*].

El enfoque particular de este estudio es la región de la intersección dorsal–trinchera, donde se ubica el segmento de la dorsal EPR-PCS, frente a las costas de Colima. Esta región está tectónicamente enmarcada por un límite amplio y difuso entre las placas NAM, COC, PAC y RIV (Figura 2). Dicho límite está enmarcado por la transformada RT, el Segmento de Esparcimiento de Moctezuma (“Moctezuma Spreading Segment” o MSS), el segmento de la dorsal EPR-PCS y la trinchera MAT (Figura 2). El límite real entre las placas RIV y COC no está definido como lo reflejan las diversas hipótesis publicadas sobre la evolución del segmento de la dorsal EPR-PCS.

2.2. Hipótesis anteriores

Diversos autores de instituciones nacionales y universidades extranjeras (E.U.A y Francia) realizaron campañas oceanográficas en la zona de estudio para coleccionar datos de geofísica marina. Unos se enfocaron en la evolución regional de la dorsal EPR en el hemisferio norte [e.g., *Mammerickx and Klitgord, 1982; Klitgord and Mammerickx, 1982; Atwater, 1989*], otros con enfoques sobre aspectos cinemáticos de la placa RIV [e.g., *DeMets and Stein, 1990; DeMets and Wilson, 1997; Bandy et al., 1998; DeMets and Traylen, 2000*] y otros enfocándose en las complejidades de los límites entre las placas que están relacionadas con la placa RIV [e.g., *Bandy et al., 1995; Kostoglodov and Bandy, 1995; Pardo and Suárez, 1995; Lonsdale, 1995; Michaud et al., 1997, 2000; Bandy et al., 2000; Bandy and Hilde, 2000; Michaud et al., 2001; Bandy et al., 2005*]. Aunque todos estos estudios han proporcionado datos significativos para tener un entendimiento generalizado de la tectónica de la placa RIV, aún no se tienen datos a detalle que permitan entender la evolución del segmento de la dorsal EPR-PCS.

En esta región unas de las hipótesis [*Mammerickx and Klitgord, 1982 y Klitgord and Mammerickx, 1982*] plantean que los lineamientos magnéticos documentan a los 5 Ma

una reubicación del esparcimiento oceánico de la dorsal “Mathematician Ridge” (MR) a la localización actual de la EPR. Poco tiempo después el esparcimiento se localizó al norte de la Zona de Fractura de Orozco y se propagó hacia el norte (Figura 3).

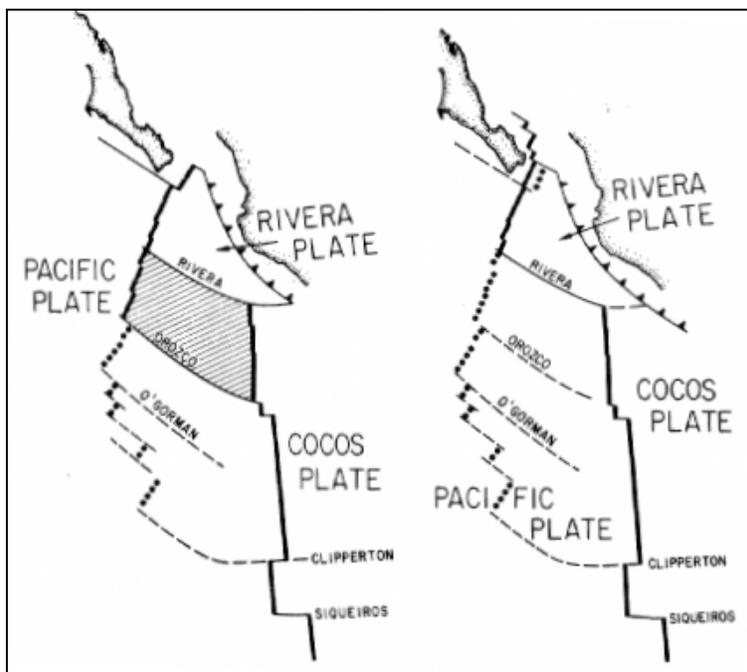


Figura 3. Diagramas de la evolución tectónica de la EPR de *Mammerickx and Klitgord* [1982] para el periodo entre 6.5 Ma y los 3.5 Ma.

Mammerickx and Klitgord [1982] propusieron que la propagación cesó a los 3.5 Ma, y que su extremo norte estaba en la latitud de la actual ubicación de la transformada RT sin definir la localización específica del propagador (Figura 3). Contrario a esto, *Bandy and Hilde* [2000] proponen que la propagación alcanzó su extremo norte a 1.77 Ma, terminando contra la trinchera MAT, al norte de la transformada RT (Figura 4). Luego el esparcimiento retrocedió y cesó alrededor de 1.5 Ma, coincidiendo con la formación de la transformada RT según *Lonsdale* [1995].

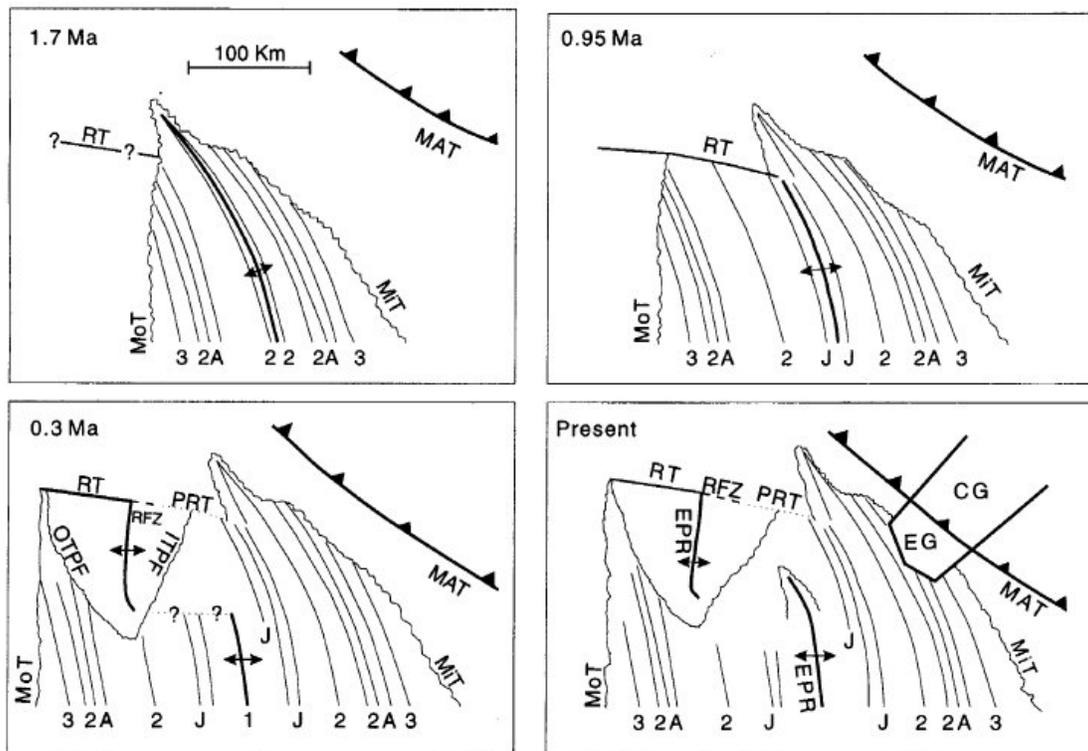


Figura 4. Diagramas de la evolución tectónica de la EPR-PCS de *Bandy and Hilde* [2000] para el periodo entre 1.7 Ma y el presente. Las líneas delgadas están identificadas con los nombres de las anomalías magnéticas marinas. Las Abreviaciones son: MiT = Michoacan Trough; OTPF = Outer tectonic Pseudofault; ITPF = Inner Tectonic Pseudofault. Ver Figura 2 para las demás abreviaciones.

Michaud et al. [2001] plantea que el segmento de la dorsal EPR-PCS pudo haber sido subducido bajo el Bloque Jalisco en la región occidental de México, argumentando que la EPR-PCS se propagó más al norte de lo documentado por *Bandy and Hilde* [2000], y que actualmente un segmento de la dorsal ha sido subducido debajo del margen continental de Jalisco (Figura 5). Como consecuencia de esto, la tectónica del margen continental involucrado, presentaría efectos, tal como se han observado en zonas de California, Baja California, Japón y Chile donde hay colisión y subducción de los centros de esparcimiento oceánico [e.g., *Cloos*, 1993; *Bourgeois et al.*, 1996; *Bourgeois and Michaud*, 2002; *Ferrari*, 2004]. Estos efectos incluyen: la deformación de la litosfera continental [e.g., *Johnston and Thorkelson*, 1997; *DeMets et al.*, 1987], erosión del material del arco frontal [e.g., *Von Huene et al.*, 2004], características geoquímicas diferentes, y amplia dispersión o ventanas carentes del magmatismo de arco [e.g., *Thorkelson*, 1996].

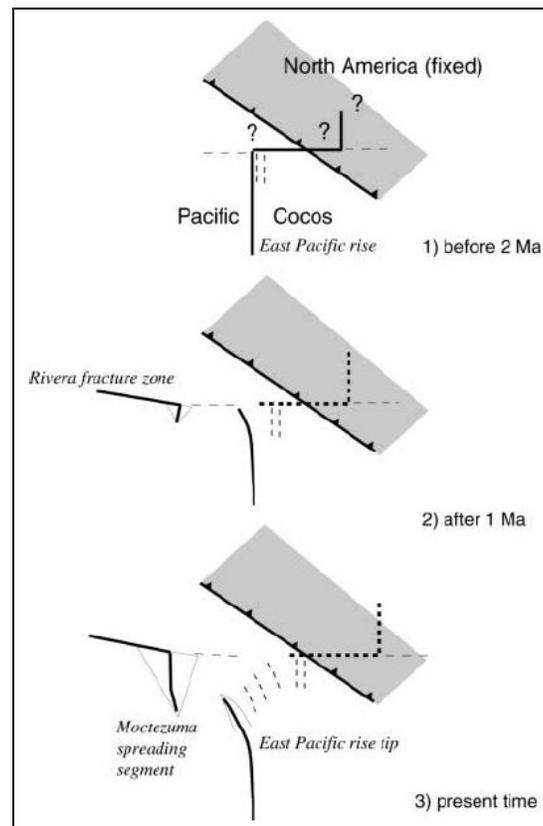


Figura 5. Esquema de la evolución tectónica de la EPR-PCS de *Michaud et al.* [2001] para el periodo entre 2 Ma y el presente.

Otros estudios en el área han generado controversias respecto al límite norte del segmento de la dorsal EPR-PCS, con varias propuestas respecto a su evolución. *Lonsdale* [1995] propone que la perturbación en la zona, está relacionada con la deformación en el límite entre placas RIV y COC, que comenzó con la Transformada de Clarión (“Clarion Transform” o CT) y después con la formación de la transformada RT (Figura 6). Alternativamente, *Bandy and Hilde* [2000] proponen que la perturbación en la zona está relacionada con el evento de propagación del segmento de la dorsal EPR-PCS, así, la perturbación tectónica está marcada por una pseudo-falla en el patrón magnético del piso oceánico, que difícilmente permite correlacionar los lineamientos magnéticos.

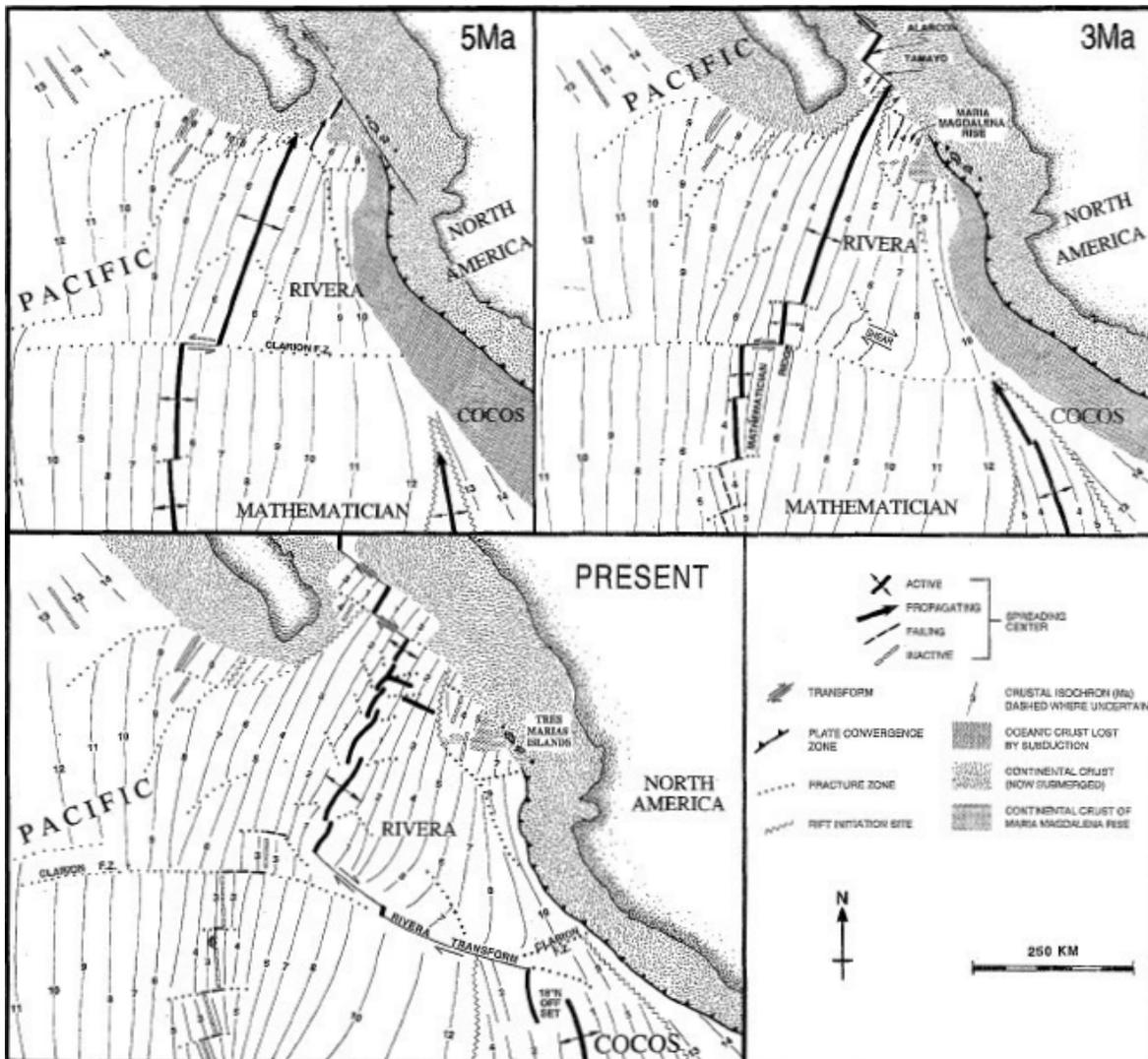


Figura 6. Diagramas de la evolución tectónica de la EPR de *Lonsdale* [1995] para el periodo entre 5 Ma y el presente.

También hay una gran controversia sobre el tipo de límite y la dirección real de las fallas actuales entre las placas COC y RIV. Se han presentado varias hipótesis respecto a la posición, la dirección y el sentido del límite actual tales como: (1) *Mammerickx and Klitdgord* [1982], *Klitgord and Mammerickx* [1982] y *Lonsdale* [1995] basándose principalmente en la interpolación e interpretación de las anomalías magnéticas, indican que no hay claridad en el límite pero que debe ser una zona de fractura, (Figuras 3 y 6). (2) *Nixon* [1982], *Eissler and McNally* [1984] y *Mammerickx and Carmichael* [1989] se basan en el comportamiento actual de las principales estructuras presentes, complementadas por datos sismológicos, donde plantean que el

límite entre las placas RIV y COC es un límite sinestral, orientado SW-NE (Figura 7a). (3) *Bandy et al.* [1995,1998, 2000], *Kostoglodov and Bandy* [1995] y *Serrato-Días et al.* [2004] plantean, basándose en datos geofísicos marinos principalmente, que es un límite divergente, con movimientos diferenciales verticales, orientado SW-NE y que está conformado por una zona de deformación discreta y por El Gordo Graben (EGG) (Figura 7b). (4) *DeMets and Stein* [1990] y *DeMets and Wilson* [1997], según datos de velocidades y direcciones de las placas involucradas, plantean que es un límite difuso que presenta compresión (Figura 7c). (5) *Michaud et al.* [1997], a partir de la falta de concordancia entre los polos Euler con los vectores de deslizamiento de los sismos o con las direcciones derivadas batimétricamente de la RT, plantean también un límite difuso pero mas amplio (Figura 7d), que enmarca una zona asociada al límite entre las placas PAC, COC y NAM-RIV (estas ultimas como una sola placa).

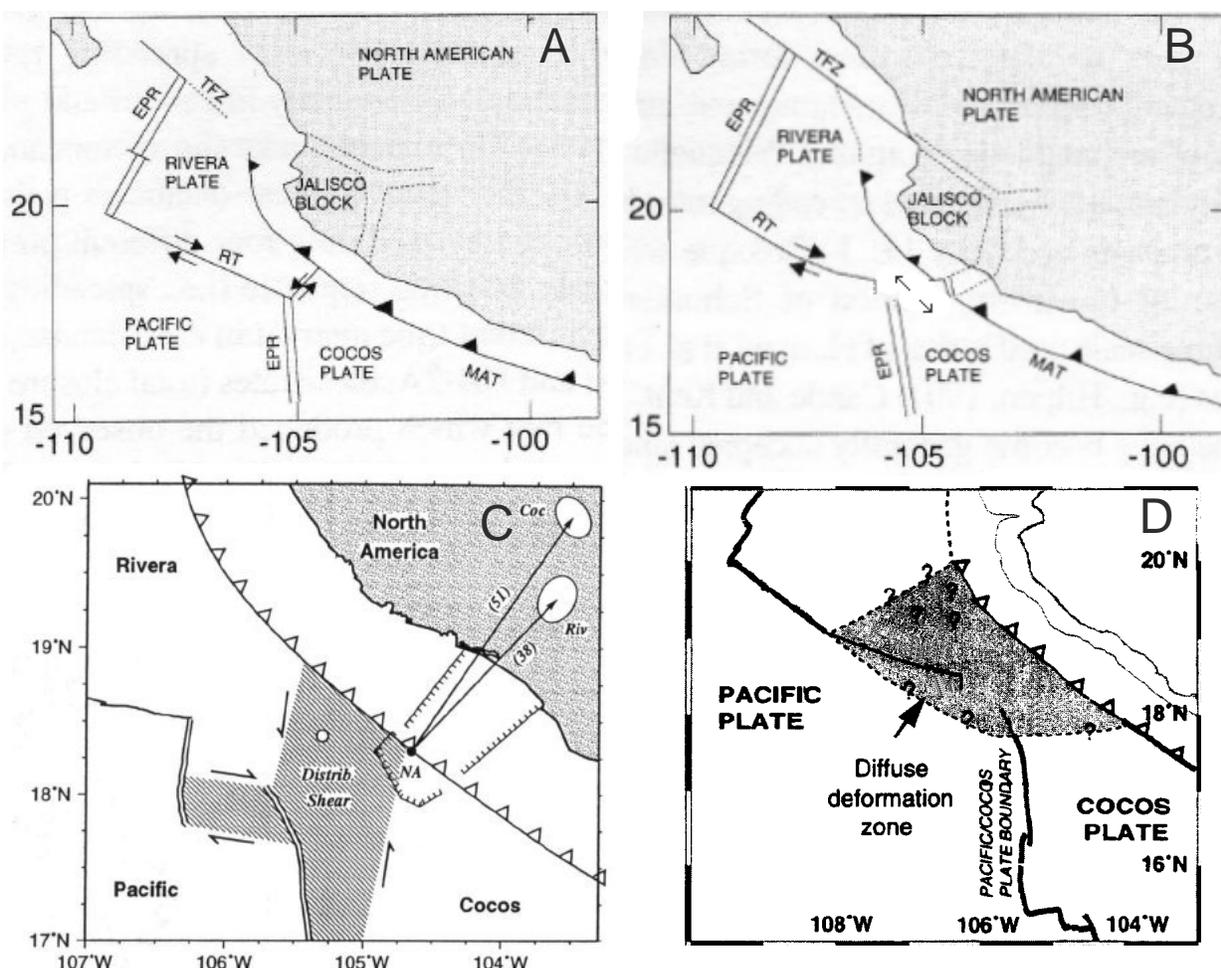


Figura 7. Diferentes hipótesis respecto a la posición, dirección y tipo de límite entre las placas de RIV y COC en el presente. A) Límite sinestral orientado SW-NE, planteado por Nixon [1982] y seguido por Eissler and McNally [1984] y Mammerickx and Carmichael [1989]. B) Límite divergente con movimientos diferenciales orientado SW-NE planteado por Bandy [1992] y seguido por Bandy et al. [1995], Kostoglodov and Bandy [1995], Bandy et al. [1998], Bandy et al. [2000] y Serrato-Días et al. [2004]. C) Límite difuso compresional planteado por DeMets and Stein [1990] y seguido por DeMets and Wilson [1997]. D). zona de deformación difusa asociada al límite entre las placas PAC, COC y NAM planteado por Michaud et al. [1997].

Adicional a lo anterior, los mecanismos focales en esta zona evidencian fallas de rumbo (Figura 8) que poseen principalmente sus planos nodales orientados aproximadamente este-oeste y norte-sur, lo que indica la necesidad subyacente de ruptura en alguna de estas direcciones, no validando las hipótesis donde se plantea que el límite actual entre las placas RIV y COC es una falla transformante con dirección SW-NE, tal como lo postularon Nixon [1982], Eissler and McNally [1984] y Mammerickx and Carmichael

[1989], pero respalda hasta cierto punto a otros autores en sus hipótesis, tales como los primeros planteamientos de *Mammerikcx and Klitdgord* [1982] y *Bandy et al.* [1998] que proponen que el límite entre estas dos placas es una falla transformante con dirección este-oeste. Igualmente soporta la hipótesis propuesta por *Eissler and McNally* [1984] y *DeMets and Wilson* [1997] en la que se plantea que el movimiento relativo entre estas dos placas es norte-sur.

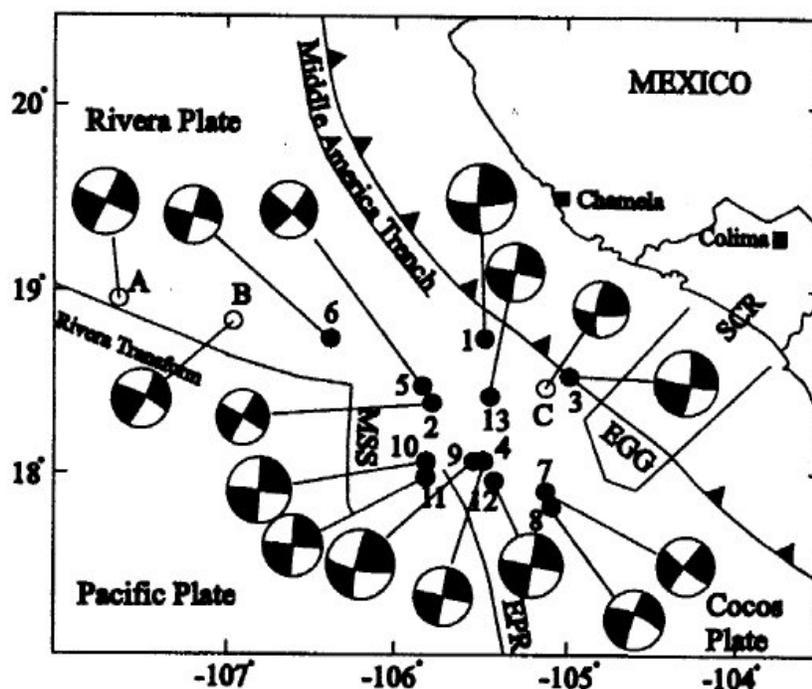


Figura 8. Localización y mecanismos focales de los principales grandes sismos cerca del límite entre las placas RIV y COC Tomada de *Suárez et al.* [1999].

Una de las investigaciones más recientes que tiene en cuenta datos sismológicos es la realizada por *Suárez et al.* [1999] en la que mediante un análisis de directividad de los datos obtenidos en el sismo del 11 de diciembre de 1995, que ocurrió dentro de la zona de estudio, se identifica que el plano nodal este-oeste del respectivo mecanismo focal es el plano de falla. Hasta cierto punto estos autores indican que dicho análisis se puede extrapolar al resto de los planos nodales de los mecanismos focales para la zona en cuestión, y concluir que el límite entre las placas RIV y COC que se tiene en el presente, tiene una dirección aproximada este-oeste con un movimiento dextro-lateral.

2.3. Datos preexistentes

En los últimos años, ha habido un interés particular en el comportamiento tectónico de la placa RIV, lo que ha derivado en una serie de esfuerzos por mejorar la cobertura batimétrica, principalmente de alta resolución, lo que ha permitido empezar a identificar y caracterizar las estructuras del relieve del piso oceánico de la placa RIV y sus límites. A ello también han contribuido muchos cruceros oceanográficos en tránsito por la zona de estudio, datos adquiridos de la base de datos GEODAS, del “National Geophysical Data Center” (NGDC), Boulder, Colorado (disponible en el sitio: http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gdas/ims/trk_cri.html).

Actualmente la batimetría multihaz es limitada para toda la placa RIV. Específicamente los estudios han detallado el relieve del piso oceánico relacionado con el segmento de la dorsal EPR-PCS al sur de los 18° N, pero al norte de esta latitud, y a los alrededores de la posición actual de la transformada RT, por lo que aún se tiene una gran incertidumbre, debido a la distribución de los datos. Estos datos batimétricos multihaz son insuficientes para dilucidar como ha sido la evolución tectónica del segmento de la dorsal EPR-PCS.

La cobertura de datos batimétricos monohaz podrá parecer más que suficiente si se mira en su totalidad (Figura 9a) al usar todos los datos disponibles en la base de datos GEODAS, pero es de anotar que la mayoría de estos datos pertenecen a cruceros en tránsito por la zona y/o a cruceros realizados con sistemas de navegación anteriores al GPS. La cobertura de cruceros recientes con posicionamiento GPS es limitada. La Figura 9 muestra que la densidad de datos disminuye drásticamente con los años. De forma similar pero aun más drásticamente los datos gravimétricos y magnetométricos disponibles en la base de datos GEODAS, han disminuido su densidad en los últimos años, tal como se puede observar en las Figuras 10 y 11. Dada la baja densidad de los datos recientes con posicionamiento de GPS, los mapas resultantes pierden resolución espacial de tal modo que no sería factible realizar mapas con tan poca cantidad de datos.

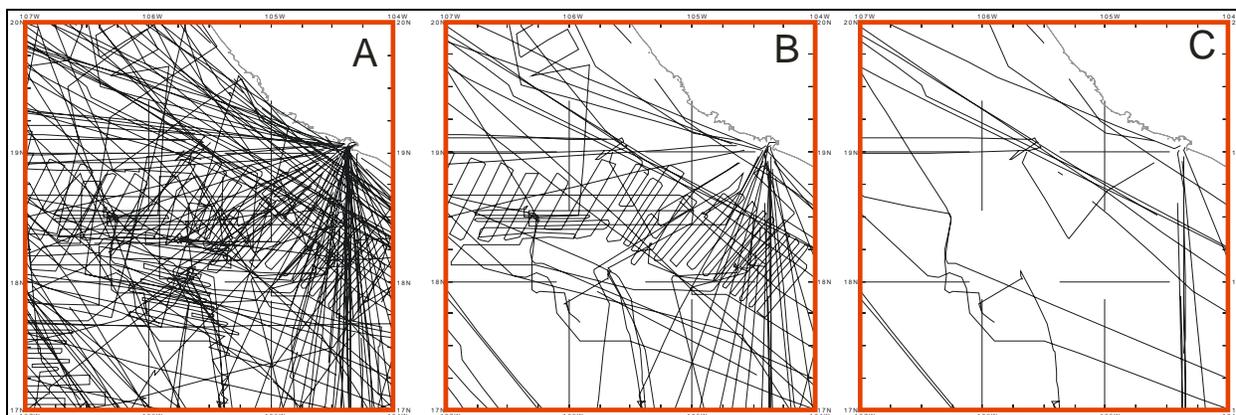


Figura 9. Cobertura de datos batimétricos. A) Datos totales desde 1958 hasta el presente, 106 cruceros. B) Datos desde 1986 hasta el presente, 44 cruceros. C) Datos desde 1992 hasta el presente, 19 cruceros.

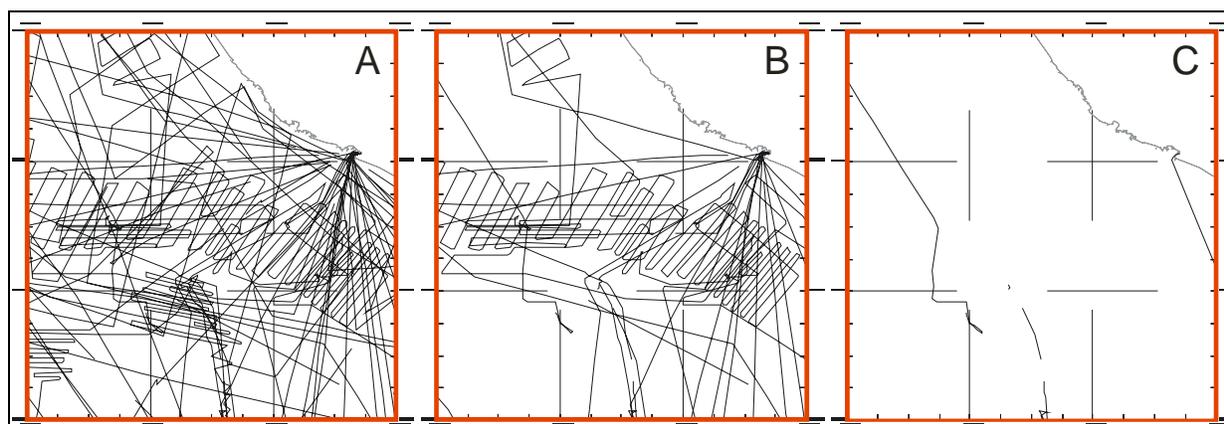


Figura 10. Cobertura de datos gravimétricos. A) Datos totales desde 1958 hasta el presente, 38 cruceros. B) Datos desde 1986 hasta el presente, 18 cruceros. C) Datos desde 1992 hasta el presente, 2 cruceros.

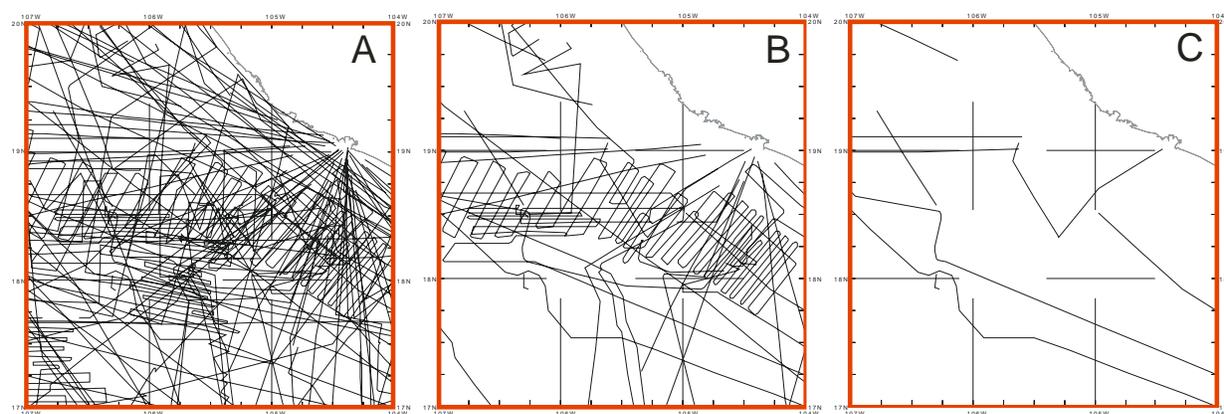


Figura 11. Cobertura de datos magnetométricos. A) Datos totales desde 1958 hasta el presente, 62 cruceros. B) Datos desde 1986, 19 cruceros. C) Datos desde 1992 hasta el presente, 6 cruceros.

Tratar de realizar mapas con la totalidad de los datos es una labor poco práctica, ya que las diferencias en precisión espacial entre los sistemas de referencia y navegación anteriores al posicionamiento con GPS y las diferencias de precisión entre los equipos geofísicos usados en los diferentes cruceros, producen imprecisiones en los datos que no permiten realizar una adecuada homogenización matemática de estos. Aunque los mapas realizados con los datos sin homogenizar permiten visualizar de manera general las estructuras principales (Figura 12), los problemas en la homogenización de los datos y su poca resolución espacial no hacen posible realizar mapas que permitan discriminar los detalles de estas estructuras geológicas, ni identificar estructuras a menor escala presentes en el área de interés.

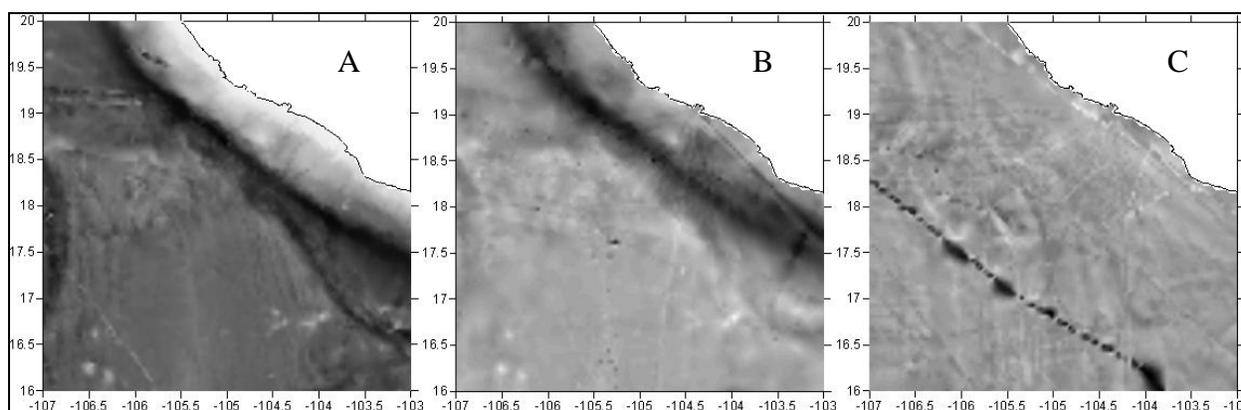


Figura 12. Mapas desarrollados con todos los datos disponibles en GEODAS. A) Batimetría. B) Gravimetría. C) Magnetometría.

Igualmente la cantidad de datos de los cruceros en el área de interés, con GPS (posteriores a 1986, preferiblemente posteriores a 1992) no son suficientes para alcanzar una resolución espacial que permita discernir los detalles de las estructuras geológicas y geofísicas en la zona.

La cobertura sistemática de datos batimétricos multihaz disponible para el área de estudio es muy buena, pero aún no está completa, no es suficiente y no permite discriminar las estructuras geológicas y geofísicas de interés (Figura 13). Este tipo de datos se encuentran disponibles en las siguientes bases de datos: la base de datos

“Multibeam Bathymetry” de la “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA) en el “National Geophysical Data Center” (NGDC), Boulder, Colorado en el sitio <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/multibeam.html>; en el programa científico de los E.U.A. “RIDGE Project” en el sitio <http://ocean-ridge.ldeo.columbia.edu/general/html/home.html>; y en el proyecto “Satellite Geodesy” de “Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego” en el sitio http://topex.ucsd.edu/WWW_html/mar_topo.html. Esta última, es una base de datos que se basa principalmente en altimetría satelital para predecir el relieve del piso oceánico controlado por datos de batimetría durante campañas oceanográficas.

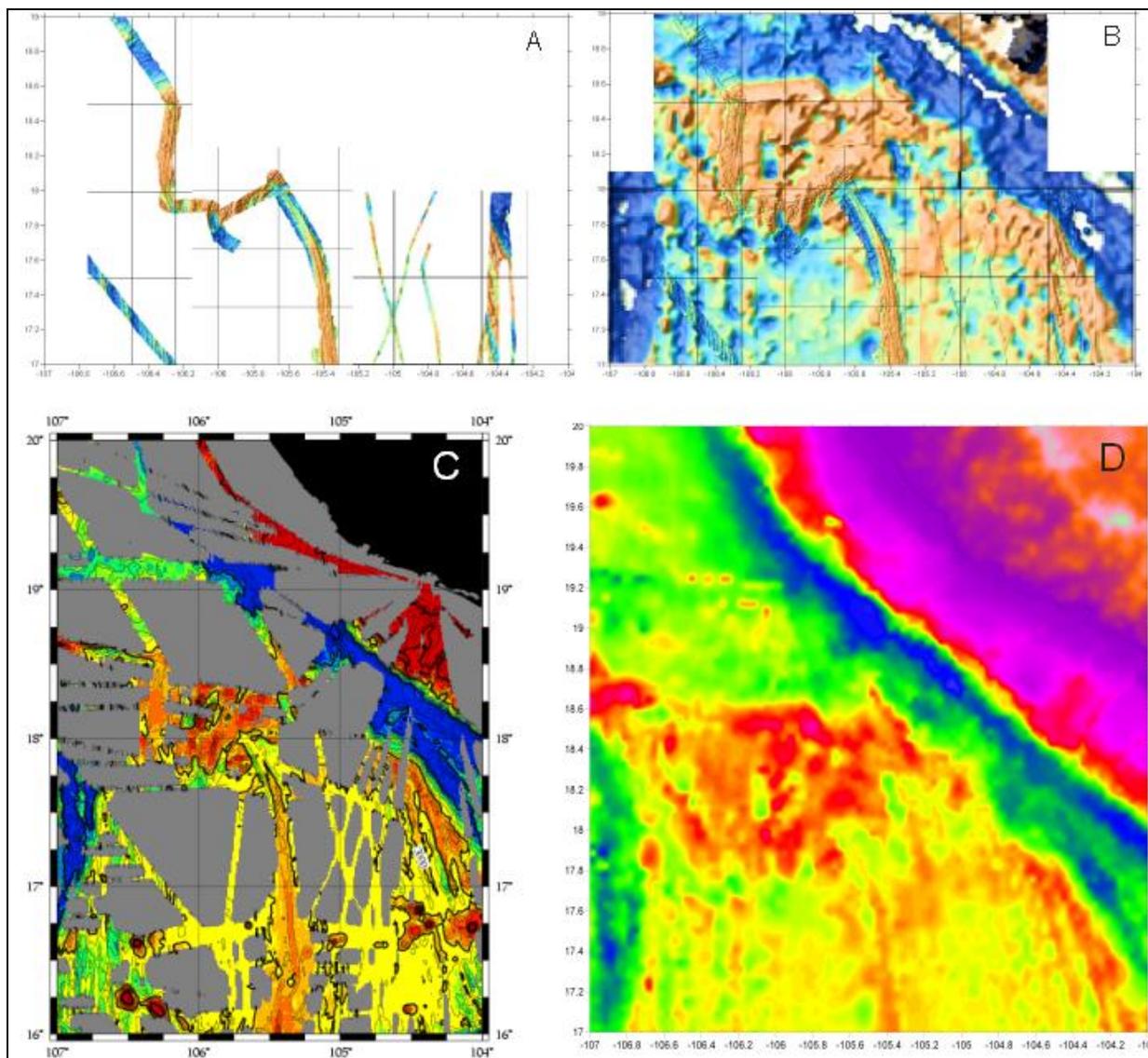


Figura 13. Mapas del relieve del piso oceánico a partir de datos de batimetría multihaz y altimetría satelital. A) cobertura de datos multibeam disponible en el “ridge proyect”. B) Morfología realizada mediante datos batimétricos complementarios y datos de alta resolución disponibles en el “ridge proyect”. C) Cobertura y morfología asociada de datos batimétricos colectados mediante equipos multibeam disponibles en “NOAA Multibeam Bathymetry”. D) morfología realizada mediante los datos de altimetría satelital y batimetría de alta resolución disponibles en “Satellite Geodesy”.

Los mapas de la Figura 14 muestran las pocas recopilaciones de datos batimétricos multihaz y de altimetría satelital que se han utilizado para cartografiar el relieve del piso oceánico en la región de la intersección del segmento de la dorsal EPR-PCS con la transformada RT y la trinchera MAT. En las Figuras 15 y 16 se observan los mapas de las recopilaciones de datos gravimétricos y magnéticos respectivamente, que se han

usado para definir las principales anomalías magnéticas y gravimétricas en la misma región.

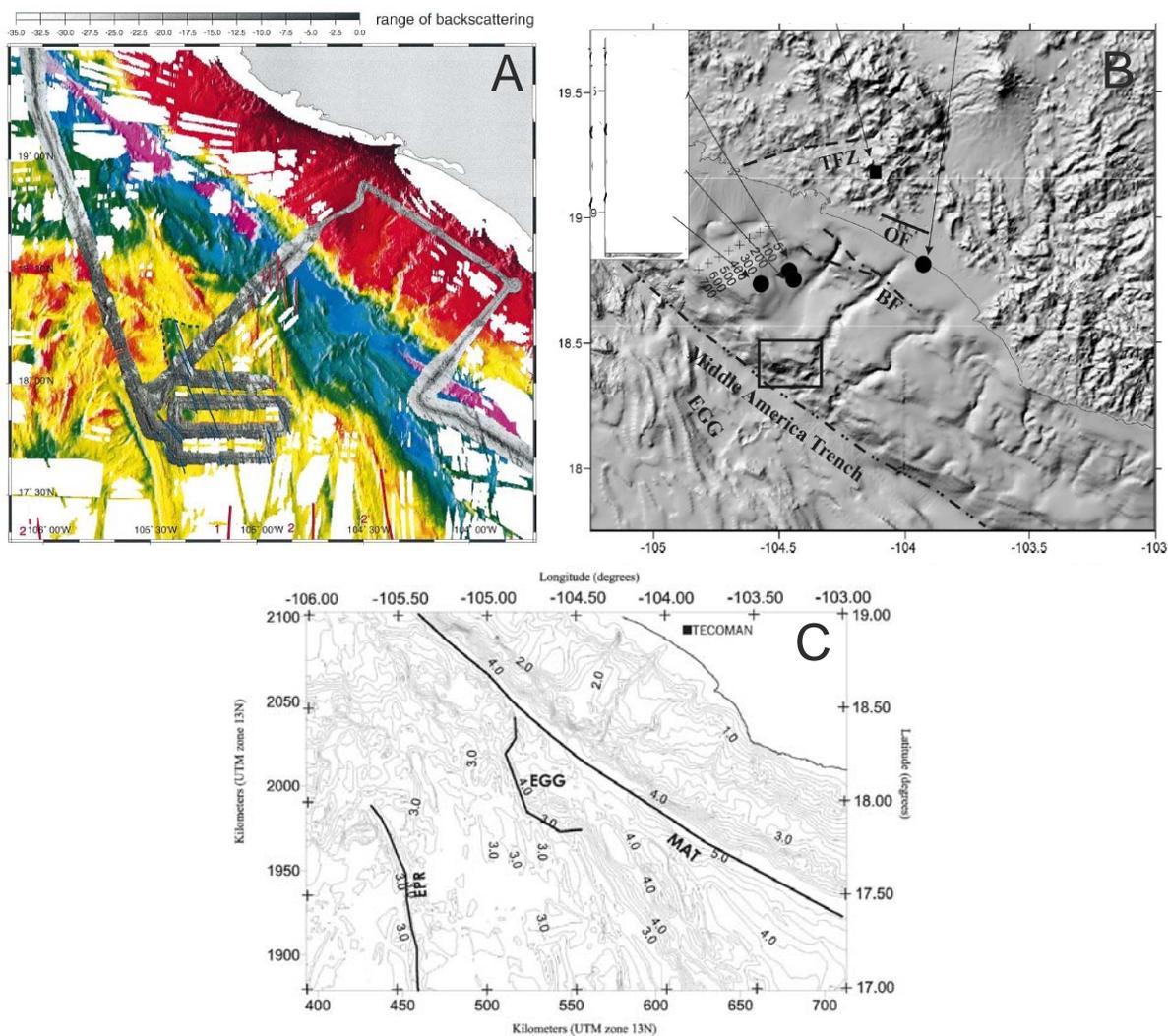


Figura 14. Mapas batimétricos. A) *Michaud et al.* [2000]. B) *Bandy et al.* [2005]. C) *Serrato-Díaz et al.* [2004].

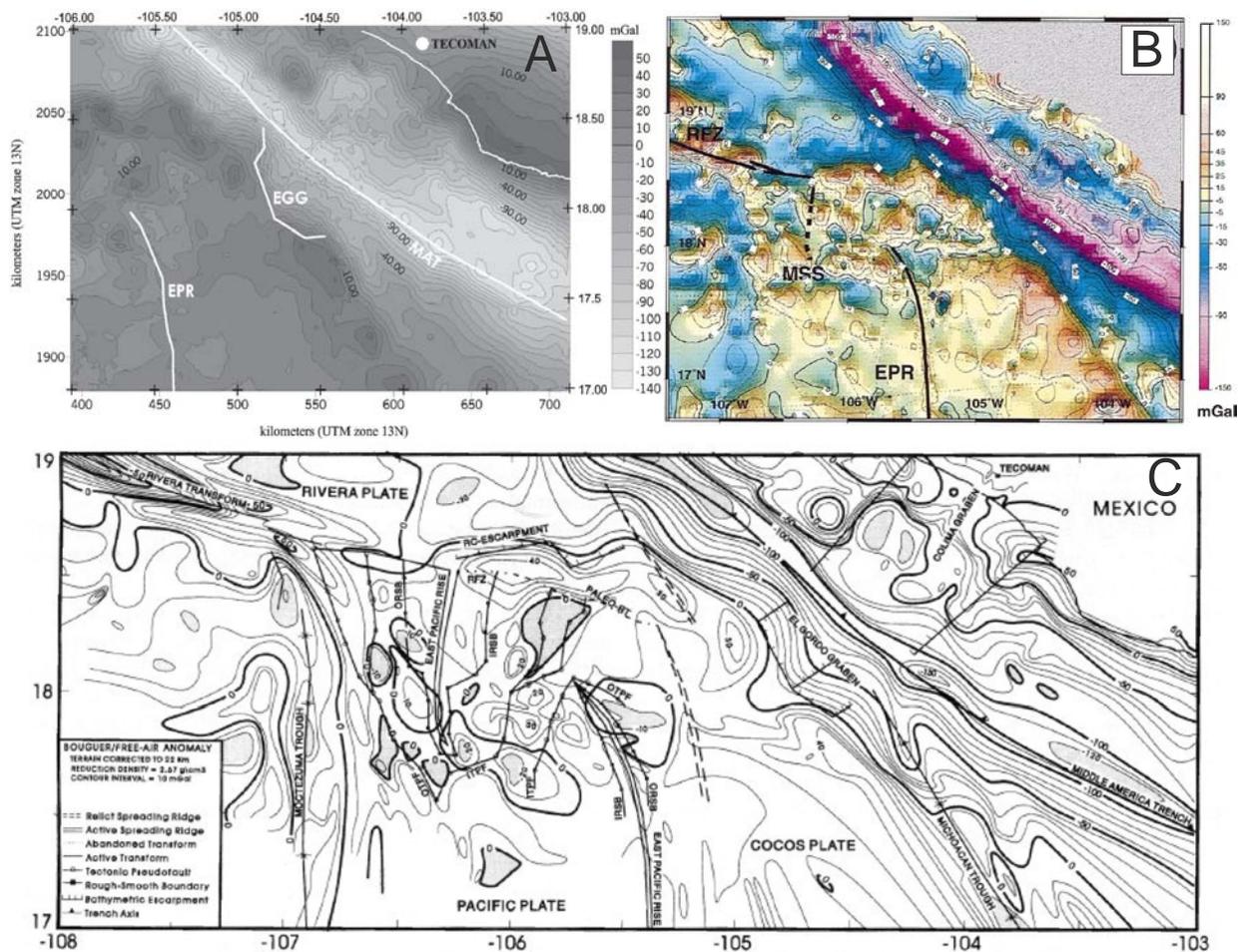


Figura 15. Mapas gravimétricos. A) Mapa de la anomalía de aire libre de *Serrato-Díaz et al.* [2004]. B) Mapa de anomalías gravimétricas de *Michaud et al.* [2000]. C) Mapa de anomalías gravimétricas (aire libre mar afuera y Bouguer tierra adentro) de *Bandy and Hilde* [2000].

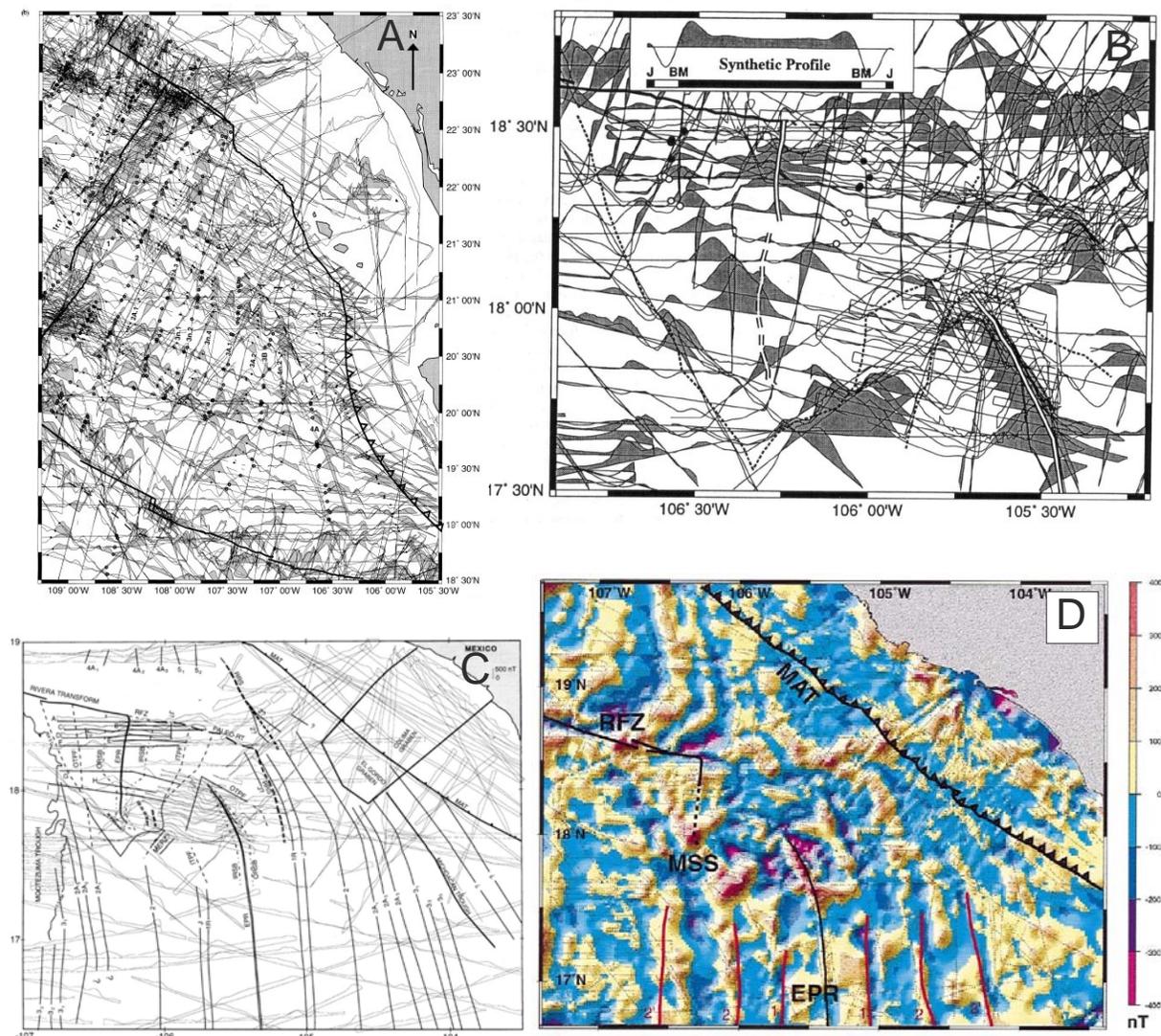


Figura 16. Mapas magnetométricos. A) Anomalías magnéticas marinas de *DeMets and Traylen* [2000]. B) Anomalías magnéticas marinas de *DeMets and Wilson* [1997]. C) Mapa de anomalías magnéticas de *Bandy and Hilde* [2000]. D) Mapa de anomalías magnéticas de *Michaud et al.* [2000].

Sin embargo es muy importante considerar que para esta investigación, el Dr. F. Michaud de la Universidad Pierre & Marie Curie y el Dr. Bandy de la UNAM, han aportado información batimétrica multihaz de alta resolución y reflectividad acústica del fondo oceánico, que aún no ha sido publicada. Esta información proviene tanto de la recopilación de las bases de datos mencionadas anteriormente y de otras, como los datos recientemente aportados por los cruceros BART-FAMEX (Figura 17). Estos últimos son utilizados en el presente estudio.

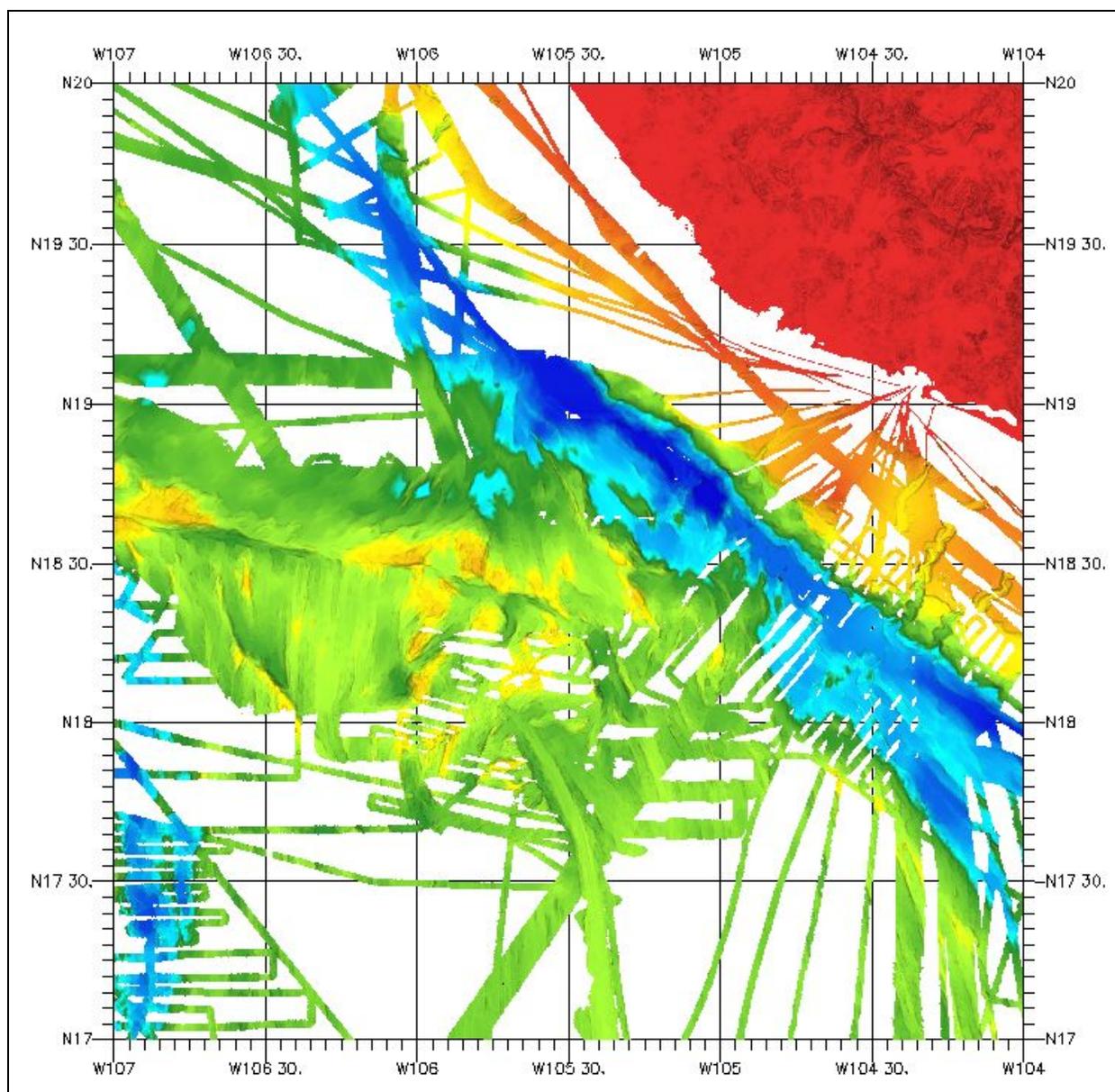


Figura 17. Mapa del relieve del piso oceánico en la región de la intersección del segmento de la dorsal EPR-PCS con la transformada RT y la trinchera MAT. Datos multihaz fueron compilados por el Dr. F. Michaud (datos no publicados, 2007). Las zonas en color azul señalan las mayores profundidades.

3. METODOLOGÍA

3.1. Datos

Los datos geofísicos usados en este estudio provienen de diferentes cruceros y las siguientes bases de datos: (1) datos batimétricos de agencias de E.U.A. “Ridge Project”, “Satellite Geodesy”, “National Geophysical Data Center” (NGDC): GEODAS y “Multibeam Bathymetry”; (2) datos batimétricos multihaz compilados por el Dr. F. Michaud de la universidad Pierre & Marie Curie (datos no publicados, 2007); (3) datos batimétricos multihaz adquiridos en el crucero BART-FAMEX a bordo del N/O L'Atalante en el año 2002; (4) datos de mecanismos focales que se encuentran en las bases de datos USGS y HARVARD (ver Anexo 2); (5) datos gravimétricos y magnetométricos de GEODAS, que estén posicionados mediante GPS, y que denoten una alta calidad en sus datos geofísicos; y (6) datos magnéticos marinos colectados en las campañas oceanográficas Mexicanas MARTIC04 Y MARTIC05, adquiridos en el B/O EL PUMA, en los años 2004 y 2005 respectivamente. Estos últimos datos se reducen respecto a los efectos de la variación diurna y de la variación por rumbo. Las variaciones diurnas fueron registradas en una estación base magnética temporal para cada crucero, ubicadas en la costa lo más cerca posible a cada levantamiento marino. Para las variaciones por rumbo se realizan círculos de calibración en el océano.

Los datos batimétricos fueron integrados teniendo en cuenta primordialmente la resolución espacial, la cobertura y su calidad. Cada conjunto de datos se revisó y analizó independientemente y de manera asociada con los demás conjuntos de datos. Posteriormente algunos conjuntos de los datos batimétricos se corrigieron en relación a sus resoluciones máximas. Los de mayor calidad se seleccionan para realizar un mapa que integre de la manera más efectiva posible la información batimétrica disponible.

Este proceso se realizó mediante la comparación gráfica y visual de la unión de pares de mapas de datos seleccionados; comparación que permitió debido a las grandes similitudes morfológicas formar un único conjunto de datos y un solo mapa con una mejor claridad de la morfología de la zona.

Durante las campañas MARTIC04 y MARTIC05 se realizaron 13 dragados con el objetivo de obtener muestras de roca de piso oceánico para fechamientos isotópicos (ver Figura 18 y anexo 3). Estos dragados fueron hechos en lugares seleccionados mediante el uso de los mapas batimétricos preexistentes y de mapas magnéticos preliminares realizados a bordo durante ambas campañas. Cada uno de los intentos de muestreo se realizó mediante el arrastre de una draga de fondo durante más de una milla náutica. De los intentos realizados solo se logró obtener solamente una buena muestra en estado fresco.

Además de lo anterior se consultaron las bases de datos de mecanismos focales para sismos, disponibles en el sitio <http://neic.usgs.gov/neis/sopar/> del “U.S. Geological Survey” (USGS) y en el sitio <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> de la Universidad de HARVARD. De ambas bases de datos se seleccionaron 34 sismos con magnitudes mayores a 4 desde 1976 para el área de estudio (Anexo 2).

Los datos magnéticos marinos fueron adquiridos en las campañas MARTIC04 y MARTIC05 a bordo del B/O EL PUMA. La campaña MARTIC04 se realizó entre los días julianos 302 y 314 del 2004, correspondientes a los días entre el 28 de octubre y el 9 de noviembre; mientras que la campaña MORTIC05 fue realizada entre los días julianos 10 y 31 del 2005, correspondientes a los días entre el 10 de enero y el 31 de enero.

Los datos fueron colectados mediante el uso de un magnetómetro marino del tipo protón precesión, modelo G877 de la marca GEOMETRICS, con una resolución de 0.1 nT. Dada su resolución y su sensibilidad, el magnetómetro es remolcado a 250 metros

del buque, distancia igual a 5 veces la eslora del B/O EL PUMA [G-877 Marine Magnetometer Operation Manual, 2001]. La programación del registro de datos se realizó mediante el software de GEOMETRICS MagLog, de manera continua, cada 2 segundos en los perfiles planeados para los cruceros MARTIC04 y MARTIC05 (Figura 18). Estos transectos fueron planteados procurando que tuvieran una dirección lo más perpendicular posible a las anomalías magnéticas esperadas. El registro magnético solo es útil en los transectos rectos, mientras que los datos provenientes de los giros de tránsito entre perfil y perfil no se consideran ya que los valores registrados son afectados por el campo magnético inducido por el buque.

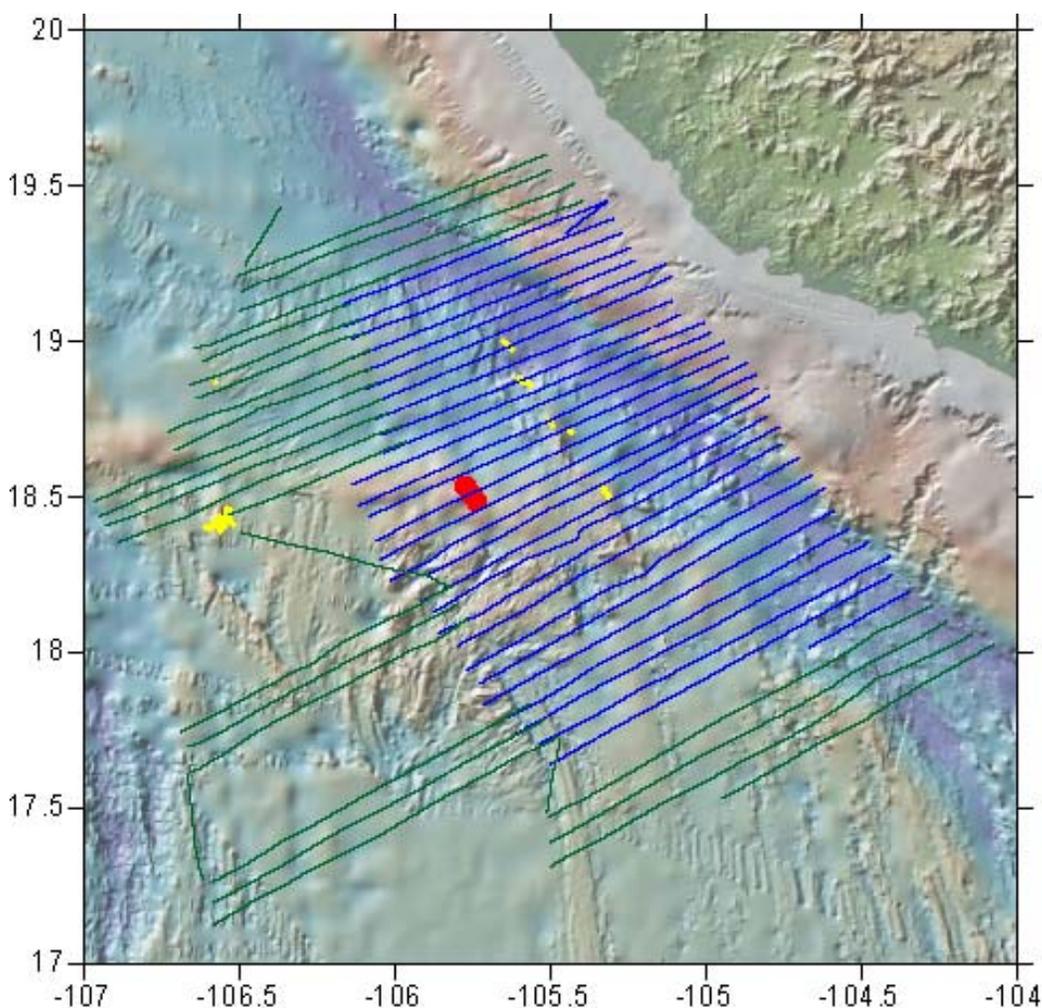


Figura 18. Mapa de los transectos magnéticos útiles de los cruceros MARTIC04 (azul) y MARTIC05 (verde). Los intentos de dragados (amarillo) y el sitio (en rojo) donde se logró sacar material de fondo. Batimetría obtenida de GeoMapApp (disponible en <http://www.geomapapp.org/>)

Para reducir el efecto del rumbo sobre los datos registrados, se adquirieron datos en círculos de calibración durante ambos cruceros (Figura 19) en zonas no muy amplias, consideradas morfológicamente planas y sin presencia de gradientes magnéticos relevantes [e.g., *Whitmarsh and Jones, 1969; Buchanan et al., 1996*]. Estos círculos de calibración se realizan en horas nocturnas para evitar fuertes contribuciones debido a la variación diurna del campo magnético terrestre [e.g., *Whitmarsh and Jones, 1969; Buchanan et al., 1996*].

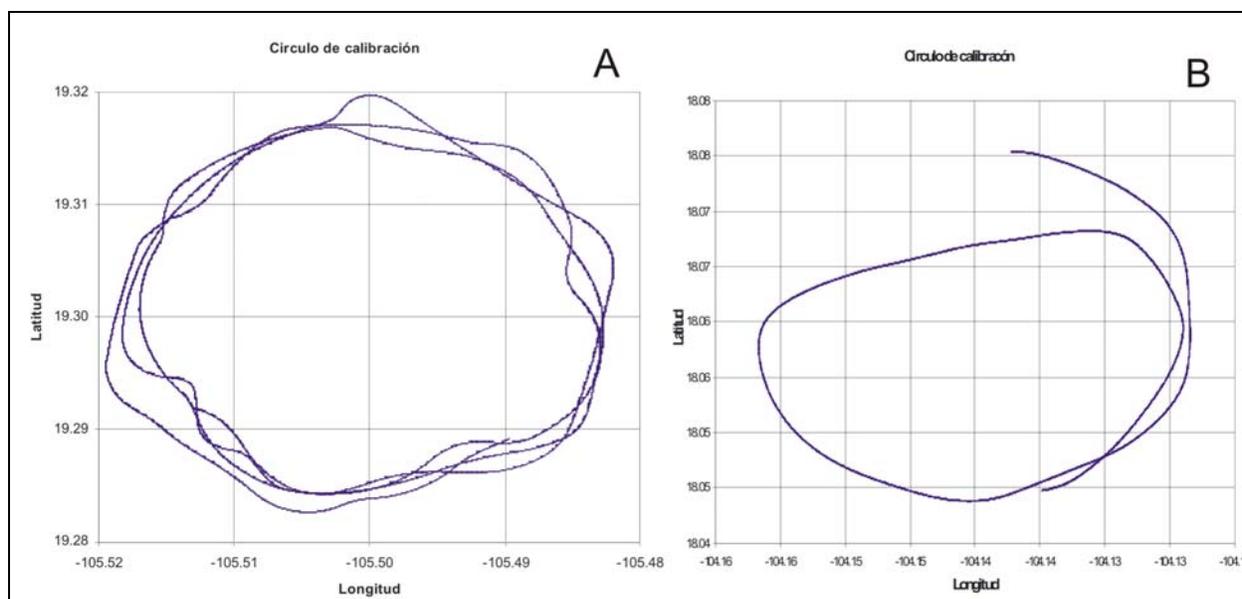


Figura 19. Trayectorias circulares usadas para las correcciones por rumbo de para: A) MARTIC04 y B) MARTIC05.

El principio de este tipo de magnetómetros de protón precesión se basa en la medición del campo eléctrico producido por la precesión (“spin”) de protones, lo que genera un campo eléctrico resultante a frecuencias proporcionales al campo magnético total. Este campo eléctrico se produce luego de que un líquido rico en protones, que se encuentran alineados al campo magnético total terrestre, se somete a una carga eléctrica inducida que ocasiona un campo artificial al cual se alinean los protones. Al cesar el campo inducido, los protones tienden a alinearse de nuevo con el campo

magnético total, mediante movimientos giratorios de precesión que generan dicho campo eléctrico [G-877 *Marine Magnetometer Operation Manual*, 2001]

Para la adquisición de los datos magnéticos en las estaciones base que se colocaron en la costa, correspondientes a las fechas de cada uno de los dos cruceros, se tiene lo siguiente: Para el crucero MARTIC04 se ubicó un magnetómetro tipo protón precesión “Scintrex Envimag” en el municipio de Manzanillo, Colima, en las coordenadas geográficas $19^{\circ} 7' 20.68''$ N y $104^{\circ} 23' 59.36''$ W dentro del campus El Naranja de la Universidad del Mar de Colima (Figura 20), el registro de datos se realizó a intervalos de 5 minutos. Para el crucero MARTIC05 se ubicó un magnetómetro tipo protón precesión “Geometrics G856” en el municipio de Chamela, Jalisco, en las coordenadas geográficas $19^{\circ} 7' 20.68''$ N y $104^{\circ} 23' 59.36''$ W, dentro de la Reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala, Jalisco (Figura 20), los datos se registraron a un intervalo de 1 minuto. Ambas estaciones fueron posicionadas por personal técnico en geomagnetismo del Instituto de Geofísica de la UNAM, de tal modo que se cumplieran los requerimientos de calidad para establecer estaciones geomagnéticas temporales base, predeterminadas para realizar correcciones diurnas. Los principales requerimientos son: que las estaciones base se encuentren en zonas de bajo gradiente geomagnético (< 4.5 nT/m), que estén ubicadas a no más de 100 millas (160934.4 m) del área de estudio (Figura 20), alejadas a más de 200 pies (60.96 m) de edificios, vías, líneas de alta tensión, y otros objetos que puedan generar perturbaciones magnéticas (Figura 21) [Breiner, 1973].

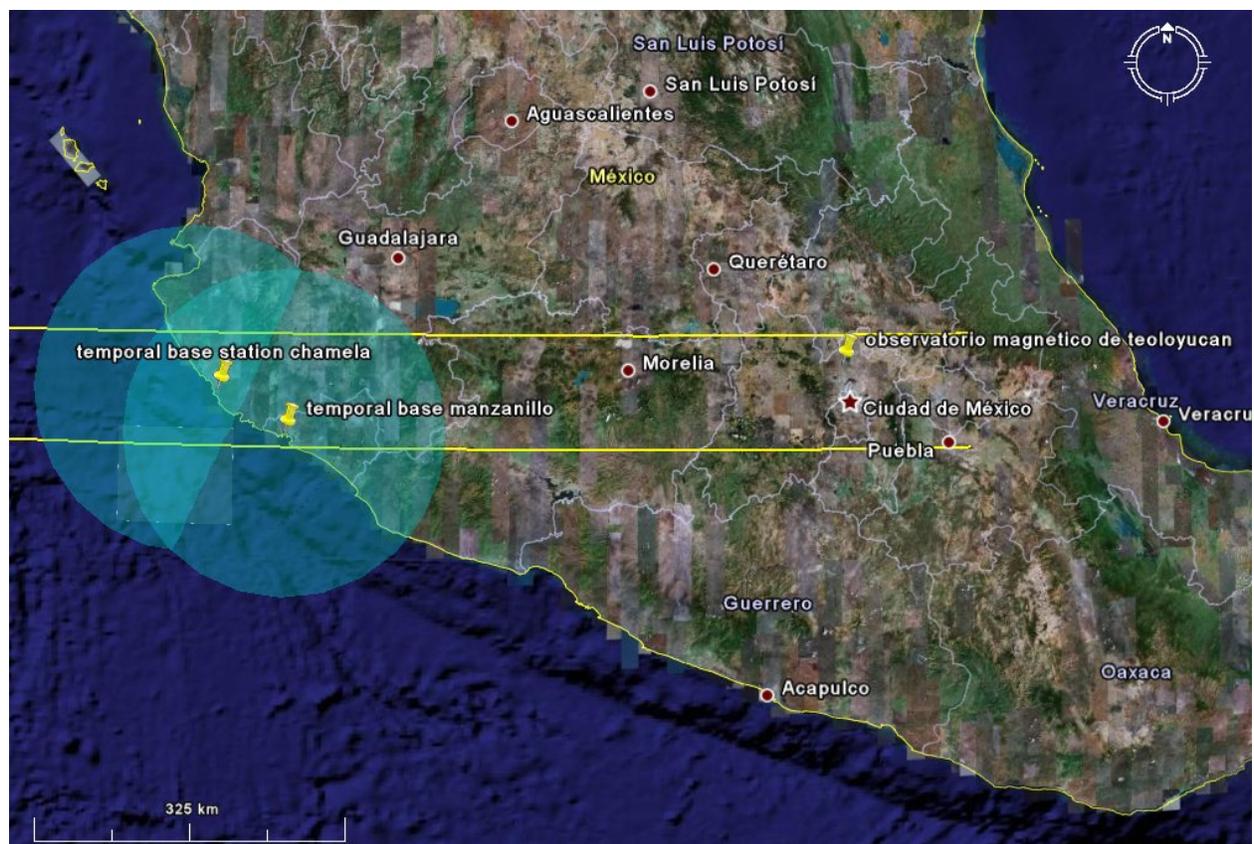


Figura 20. Mapa esquemático de la posición de las estaciones temporales base, sus áreas de influencia y su relación geográfica con el observatorio magnético de Teoloyucan y con el área de estudio (polígono).



Figura 21. Mapas esquemáticos de las áreas de seguridad respecto a perturbaciones magnéticas para las estaciones base. A). Base magnética temporal en Manzanillo, B): Base magnética temporal en Chamela.

De los registros magnéticos en las estaciones base se obtienen series de tiempo que permiten calcular las variaciones diurnas del campo magnético. De dichas estaciones se obtuvieron las graficas de las Figuras 22 y 23, correspondientes al periodo de registro de cada uno de los dos cruceros. Los valores registrados se comparan con las graficas del “Disturbance Storm Time index” (índice DST) para los mismos periodos de tiempo. El DST es un índice geomagnético por medio del cual se supervisa el nivel de estabilidad del campo magnético terrestre alrededor de los trópicos (disponible en el sitio del “World Data Center for Geomagnetism”, Kyoto: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>).

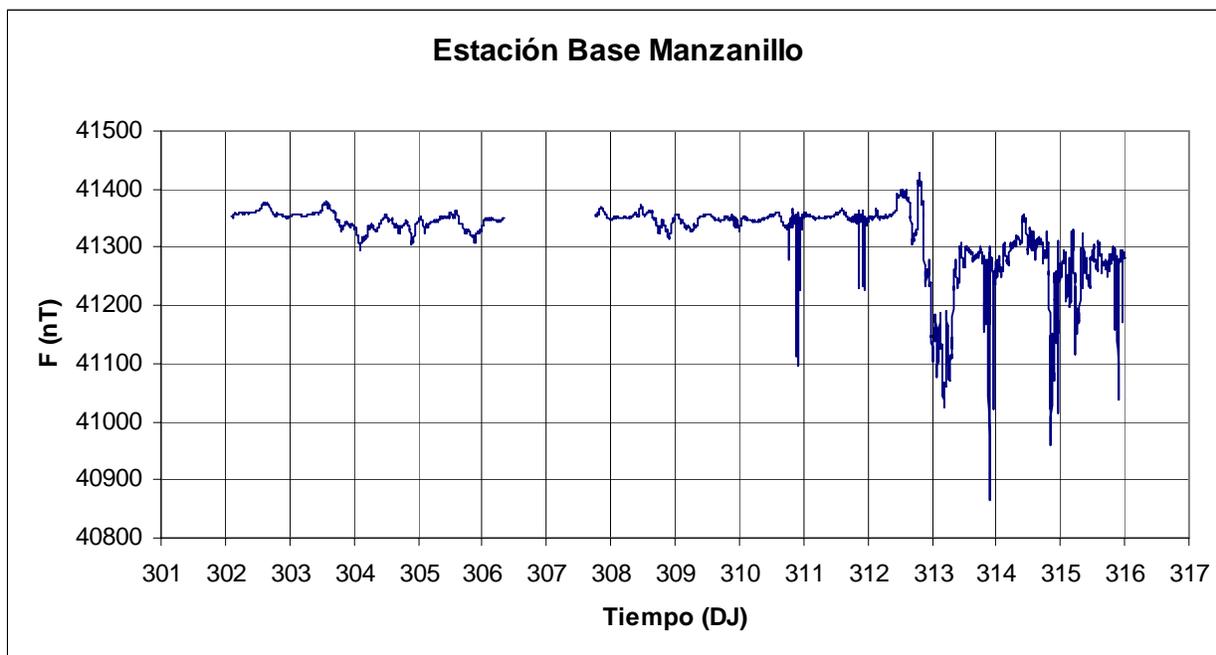


Figura 22. Grafica del campo magnético total (F) para la estación base de Manzanillo durante el crucero MARTIC04 (del DJ-302 al DJ-315).

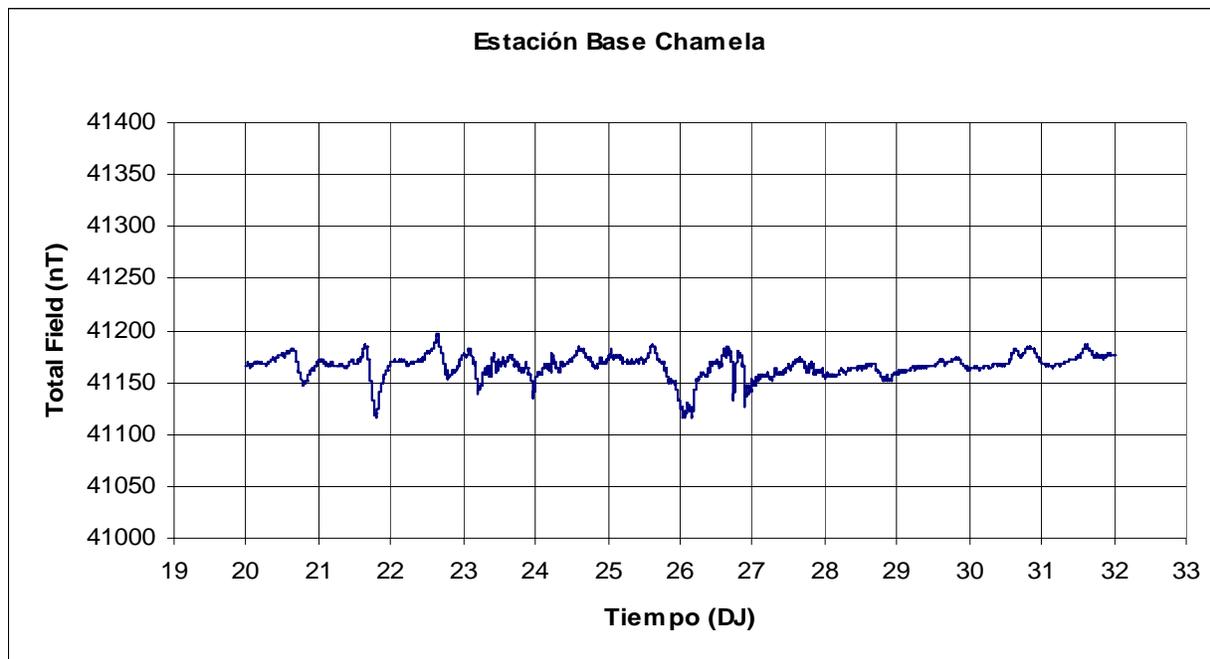


Figura 23. Grafica del campo magnético total (F) para la estación base de Chamela durante el crucero MARTIC05 (del DJ-20 al DJ-31).

Los datos y las graficas del DST (Figuras 24 y 25) permiten comparar los datos adquiridos en las estaciones base y así poder determinar si los datos se pueden usar o han sido afectados por perturbaciones antrópicas, o por tormentas magnéticas. De las series de tiempo de las estaciones base y de su comparación con las series de tiempo de DST correspondientes, se observan periodos de días tranquilos: DJ 302 y 303 en el 2004 en la estación base de Manzanillo (Figuras 22 y 24), DJ 20-25 y 27-31 en el 2005 en la estación base de Chamela (Figuras 23 y 25); mientras que los días perturbados fueron: DJ 304, 305, 308 y 309 en el 2004 en la estación base de Manzanillo (Figuras 22 y 24) y DJ 26 en el 2005 en la estación base de Chamela (Figuras 23 y 25). En el registro de la estación base de Manzanillo en el 2004 hubo días en que se carece de datos: DJ 306 y 307 (Figura 22), días con perturbaciones antrópicas: DJ 310 y 311 (Figura 22), y el comienzo de una tormenta magnética en DJ 312 y días consecutivos afectados por esta tormenta magnética: DJ 313, 314 y 315 (Figuras 22 y 24).

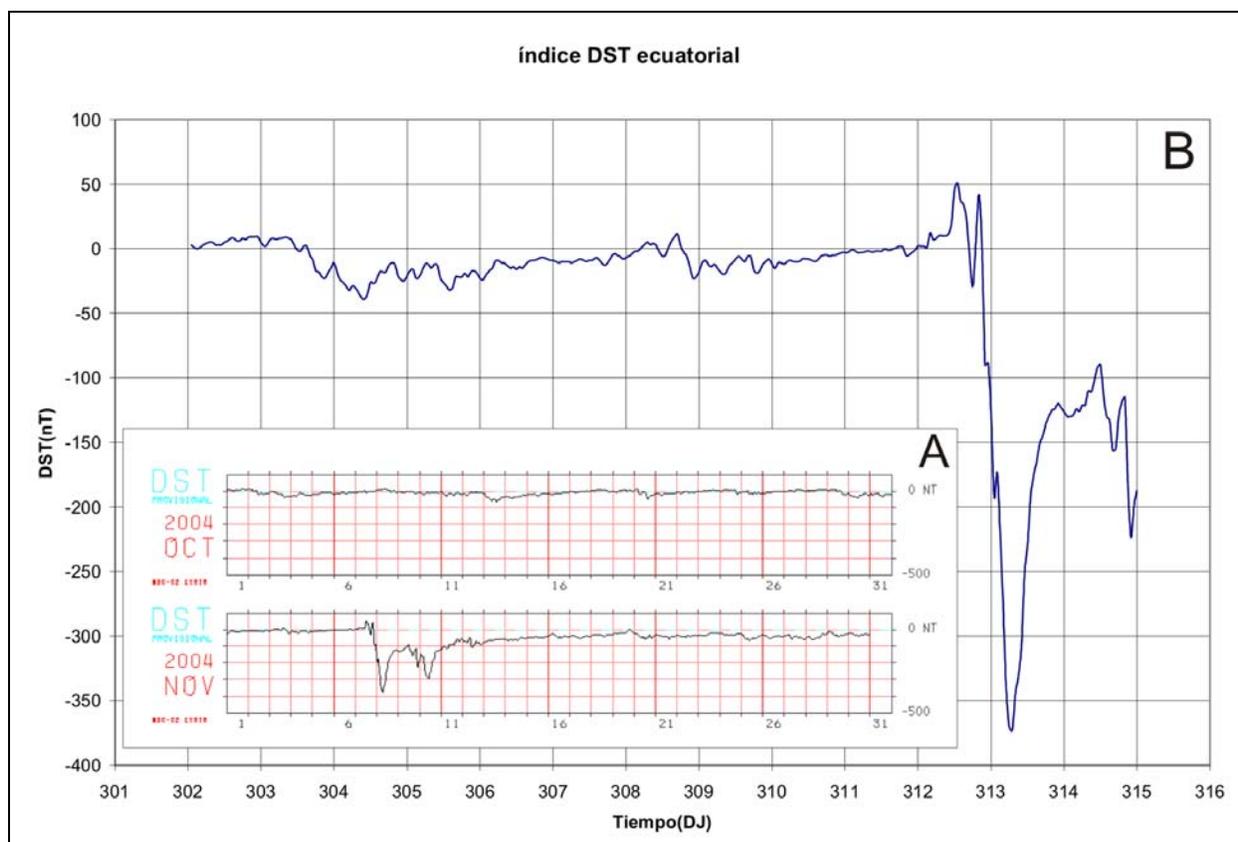


Figura 24. Gráfica del índice DST ecuatorial. A) para los meses de octubre y noviembre del 2004. B) para el periodo de días del Crucero MARTIC04. Datos tomados del centro de datos mundiales (WDC) magnéticos de Kyoto. El tiempo está en días (UT).

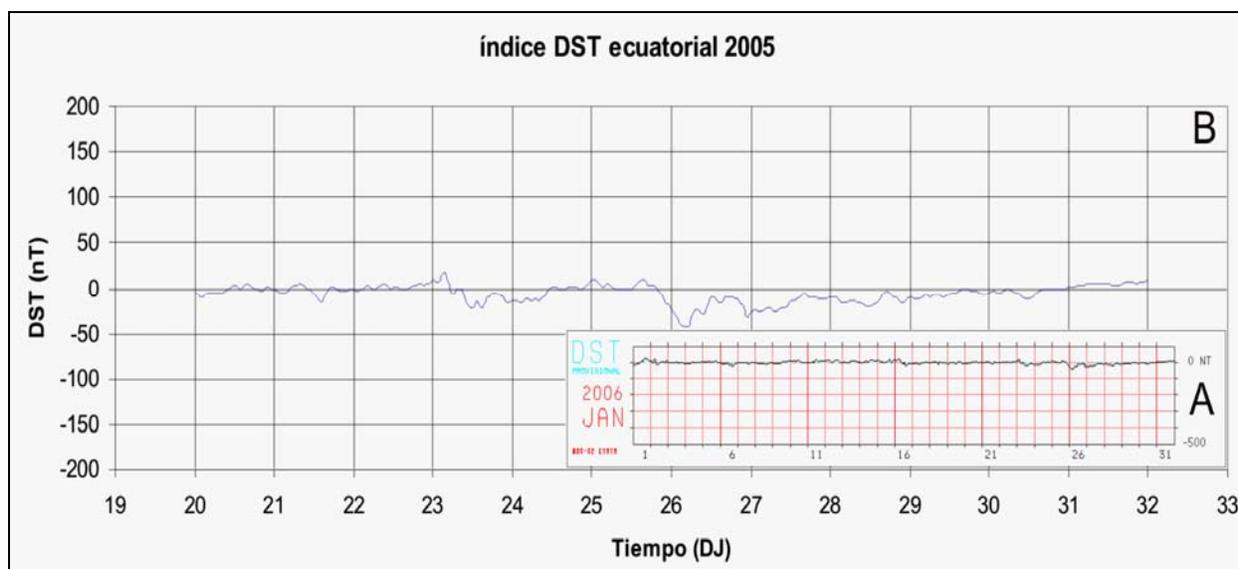


Figura 25. Gráfica del índice DST ecuatorial, A) para el mes de enero del 2006. B) para el periodo de días del Crucero MARTIC05. Datos tomados del centro de datos mundiales (WDC) magnéticos de Kyoto. El tiempo está en días (UT).

En caso de presentarse tormenta magnética durante las campañas, no se utilizan los datos que hayan sido tomados durante dicha actividad. Para los periodos donde por motivos de fuerza mayor no se obtuvo el registro de datos, se realizó una comparación, corrección y posterior introducción y redefinición de la serie de tiempo (ver Anexo 1) mediante la extrapolación de datos adquiridos en el observatorio magnético de Teoloyucan para el mismo periodo de tiempo (Figura 26). Datos que por las características intrínsecas del observatorio de Teoloyucan y de su ubicación, a menos de un grado de latitud de las estaciones base, permiten realizar dichos procedimientos [M.Sc. Hernández-Quintero, comunicación escrita, 2007 – Servicio Geomagnético Instituto de Geofísica –UNAM]. Para las zonas con perturbaciones antrópicas se realizan procedimientos matemáticos que nos permiten eliminar esos ruidos en nuestras señales de tiempo para poder usar ese intervalo del registro (ver Anexo 1).

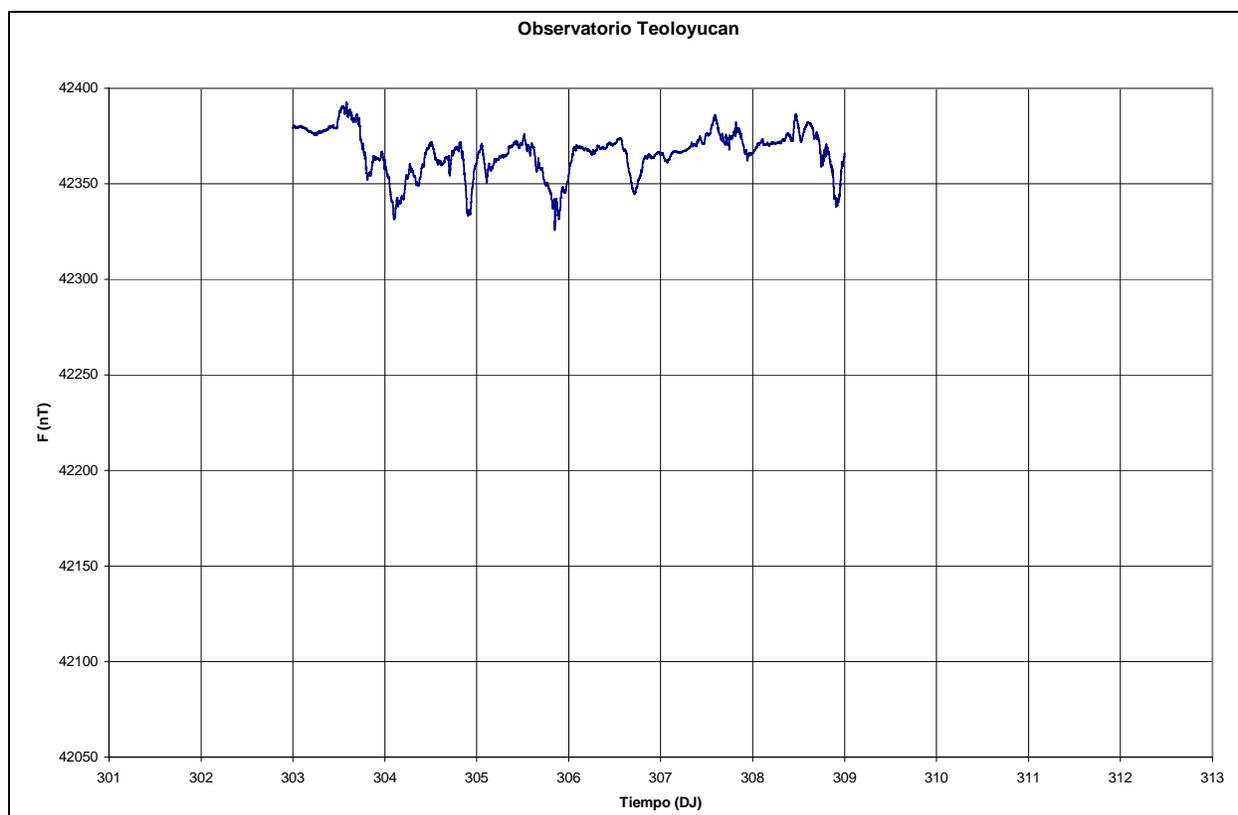


Figura 26. Grafica del campo magnético total (F) para el observatorio magnético de Teoloyucan durante el crucero MARTIC04 (del DJ-303 al D-J309). Datos sin influencia de tormenta magnética.

3.2. Cálculo de las Anomalías Magnéticas

Para realizar los análisis e interpretaciones de los datos magnéticos marinos adquiridos en ambos cruceros oceanográficos es necesario reducirlos a anomalías magnéticas. El campo magnético registrado por el magnetómetro está compuesto por los valores del campo magnético total, que está dominado por la componente magnética bipolar de la tierra y el magnetismo remanente, además de registrar las variaciones diurnas y las influencias generadas por el rumbo del barco. El magnetismo remanente constituye las anomalías magnéticas de interés, por lo que es necesario reducir los valores de campo total registrados respecto a las variaciones magnéticas diurnas, a los efectos inducidos por el rumbo del barco y al campo magnético teórico (Ecuación 1) para la zona. Este último a partir del uso de la fórmula del “International Geomagnetic Reference Field” IGRF-10. (Disponible en el sitio del “World Data Center for Solid Earth Geophysics” <http://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf.html> y en el sitio del “National Geophysical Data Center” (NGDC) <http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/struts/calcPointIGRF>).

Para calcular las anomalías magnéticas $\Delta Fm(\varphi, \lambda, t)$ se tiene la siguiente ecuación:

$$\Delta Fm(\varphi, \lambda, t) = Fm_{obs_corr}(\varphi, \lambda, t) - Fm_{IGRF}(\varphi, \lambda, t), \quad (1)$$

Donde:

$Fm_{obs_corr}(\varphi, \lambda, t)$ Son los valores magnéticos marinos observados – corregidos,

$Fm_{IGRF}(\varphi, \lambda, t)$ Son los valores teóricos del IGRF,

Para las coordenadas latitud y longitud (φ, λ) , de las posiciones del magnetómetro a lo largo del levantamiento marino a un tiempo dado (t) .

Para el segundo término de la Ecuación 1, los valores del IGRF-10 son calculados para la época 2004, cuando se realizó la campaña MARTIC04 y para la época 2006, cuando se realizó la campaña MARTIC05.

El primer término de la Ecuación 1 establece las reducciones por las variaciones relativas diurnas y por el efecto del rumbo del barco sobre el campo magnético registrado. Este primer término está definido por la siguiente ecuación:

$$Fm_{obs_corr}(\varphi, \lambda, t) = Fm_{obs}(\varphi, \lambda, t) - \Delta F_{diurna}(t) - \Delta Fm_{rumbo}(\theta), \quad (2)$$

Donde para un tiempo dado (t):

$Fm_{obs_corr}(\varphi, \lambda, t)$ Son los valores magnéticos marinos observados – corregidos,

$Fm_{obs}(\varphi, \lambda, t)$ Son los valores magnéticos marinos observados,

$\Delta F_{diurna}(t)$ Son los valores de las variaciones diurnas y

$\Delta Fm_{rumbo}(\theta)$ Es el efecto por el rumbo del buque respecto al norte geográfico.

Para resolver la Ecuación 2, se requiere conocer la variación diurna $\Delta F_{diurna}(t)$ (Ecuación 3) y los efectos del rumbo del buque $\Delta Fm_{rumbo}(\theta)$ (Ecuaciones 4, 5 y 6). La variación diurna $\Delta F_{diurna}(t)$ es calculada a partir de los datos magnéticos registrados en una estación base en la costa, en referencia al valor del IGRF-10 calculado para dicha localidad y a las zonas de menor influencia, de los días no perturbados (días típicos) de la serie de tiempo de la estación base [e.g., *Buchanan et al.*, 1996; *Whitmarsh and Jones*, 1969], representada por la siguiente ecuación:

$$\Delta F_{diurna}(t) = F_{base}(\varphi_b, \lambda_b, t) - F_{IGRF_base}(\varphi_b, \lambda_b, t) - F_{base_I\ min}(\varphi_b, \lambda_b, t). \quad (3)$$

Donde:

$F_{base}(\varphi_b, \lambda_b, t)$ Son los valores observados en la base,

$F_{IGRF_base}(\varphi_b, \lambda_b, t)$ Es el valor teórico en la base,

$F_{base_I\ min}(\varphi_b, \lambda_b, t)$ Es el valor que representa la influencia mínima y

(φ_b, λ_b) Son las coordenadas fijas de la ubicación de la estación base temporal.

Así mismo, las variaciones relativas por rumbo $\Delta Fm_{rumbo}(\theta)$, referidas en la Ecuación 2, son calculadas a partir de los datos magnéticos marinos registrados en los círculos de

calibración realizados en cada crucero. Primero se tiene que reducir los datos del círculo de calibración $Fm_{reducidos_circulo}(\theta)$ respecto a la variación diurna y al IGRF-10 mediante la siguiente ecuación:

$$Fm_{reducidos_circulo}(\varphi_c, \lambda_c, t) = Fm_{obs_circulo}(\varphi_c, \lambda_c, t) - Fm_{IGRF_circulo}(\varphi_c, \lambda_c, t) - \Delta F_{diurna}(t). \quad (4)$$

Donde:

$Fm_{obs_circulo}(\varphi_c, \lambda_c, t)$: Datos magnéticos marinos registrados en los círculos de calibración,

$Fm_{IGRF_circulo}(\varphi_c, \lambda_c, t)$: Valores teóricos,

$\Delta F_{diurna}(t)$: Variaciones relativas diurnas y

(φ_c, λ_c) : Coordenadas en que se tomaron los datos sobre los círculos de calibración.

El método de *Bullard and Mason* [1961] es utilizado para corregir los datos magnéticos marinos registrados de las influencias del rumbo que lleva el buque a partir de los datos registrados sobre los círculos de calibración. La aplicación de este método determina que el campo magnético medido en un punto Q por un magnetómetro remolcado por la popa de un barco puede ser expresado respecto a su rumbo mediante la siguiente ecuación:

$$Fm_{obs_Q}(\varphi_Q, \lambda_Q, t) = Fm_{IGRF_Q}(\varphi_Q, \lambda_Q, t) + C_0 + C_1 \cos \theta + C_2 \cos 2\theta + S_1 \sin \theta + S_2 \sin 2\theta. \quad (5)$$

Donde para un punto dado (Q) y un tiempo dado (t):

$Fm_{obs_Q}(\varphi_Q, \lambda_Q, t)$: Son los datos magnéticos marinos observados,

$Fm_{IGRF_Q}(\varphi_Q, \lambda_Q, t)$: Son los valores teóricos del campo magnético,

θ : Es el rumbo del barco y

C_0, C_1, C_2, S_1, S_2 : Son constantes que están en función de las propiedades magnéticas del barco, del valor magnético local y de la posición relativa del punto (Q) respecto al barco.

Buchanan et al. [1996] establece que para encontrar la influencia relativa del rumbo $\Delta Fm_{rumbo}(\theta)$ en los datos magnéticos observados de una manera práctica, se realiza una aproximación mediante el método de mínimos cuadrados con la forma de la ecuación dada por *Bullard and Mason* [1961], aproximación en la cual los términos S_1 y S_2 senos de la Ecuación 5, son despreciables debido a que son dependientes de la simetría del campo magnético del barco. Por lo que queda solo considerar los términos que contienen los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 , que serán utilizados para obtener las correcciones por rumbo $\Delta Fm_{rumbo}(\theta)$ en la siguiente ecuación:

$$\Delta Fm_{rumbo}(\theta) = C_0 + C_1 \cos \theta + C_2 \cos 2\theta. \quad (6)$$

Los datos de las variaciones por rumbo $\Delta Fm_{rumbo}(\theta)$, son normalizados al norte magnético como lo propone *Buchanan et al.* [1996].

3.3. Procesamiento de los datos magnéticos

Los datos magnéticos adquiridos en los transectos rectilíneos de los cruceros MARTIC04 y MARTIC05 fueron reducidos a anomalías magnéticas, aplicando solamente las correcciones por rumbo y por las variaciones diurnas. El procesamiento de estos datos magnéticos, requirió de revisiones detalladas de los datos de las estaciones base y de los círculos de calibración. Se determinó que las series de tiempo de las estaciones base utilizadas para las correcciones diurnas no deberían tener períodos con influencias externas (tormentas magnéticas, y/o influencias antrópicas). Estas series de tiempo son remuestreadas al mismo intervalo de muestreo que los datos de los transectos de los cruceros. Para una mayor claridad respecto a los procedimientos efectuados para preparar estas series de datos consultar el Anexo 1.

Las series de tiempo de las estaciones base se remuestrearon cada 2 segundos, tal como se observa en la Figuras 27 y 28, gráficas de las series de tiempo de los datos

pre-procesados de las estaciones base de Manzanillo y de Chamela, correspondientes a los días de adquisición de datos durante los cruceros MARTIC04 y MARTIC05.

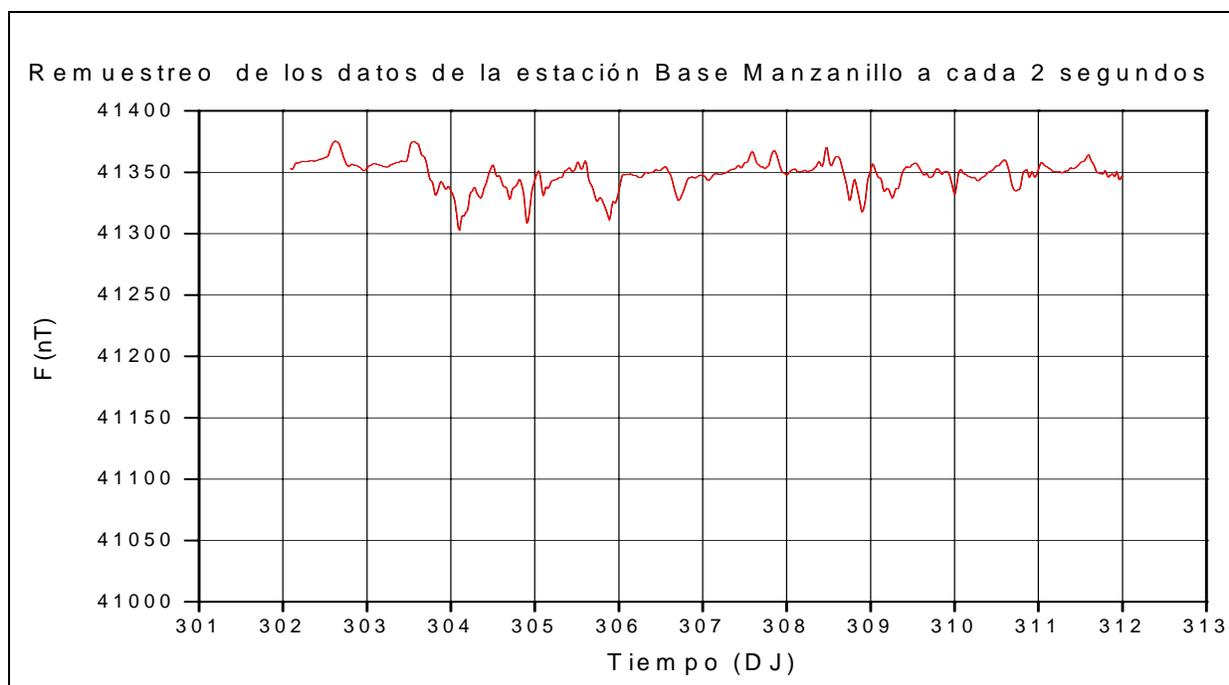


Figura 27. Gráfica del campo magnético total (F) de la estación base de Manzanillo, durante el crucero MARTIC04, remuestreados cada 2 segundos.

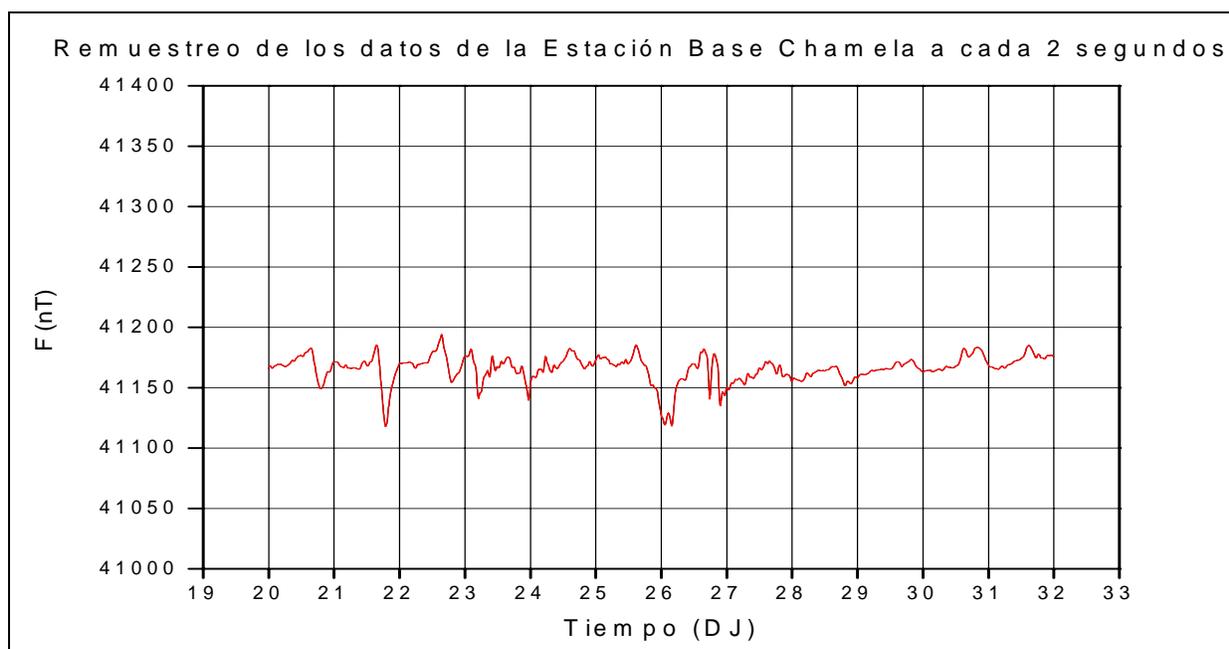


Figura 28. Gráfica del campo magnético total (F) de la estación base de Chamela durante el crucero MARTIC05, remuestreados cada 2 segundos.

Luego los datos se reducen respecto al valor del campo magnético teórico IGRF-10 de cada estación base, y se normalizaron a un valor 0 nT, determinado en función de los periodos de menor influencia de los días típicos en las series de tiempo de las estaciones base (ver anexo 1). Las Figuras 29 y 30 muestran las series de tiempo para las estaciones base de Manzanillo y de Chamela, y su comparación con la serie de tiempo del DTS, para validar la naturaleza de las variaciones diurnas observadas, confirmándose que son los adecuados para realizar la corrección diurna de los datos.

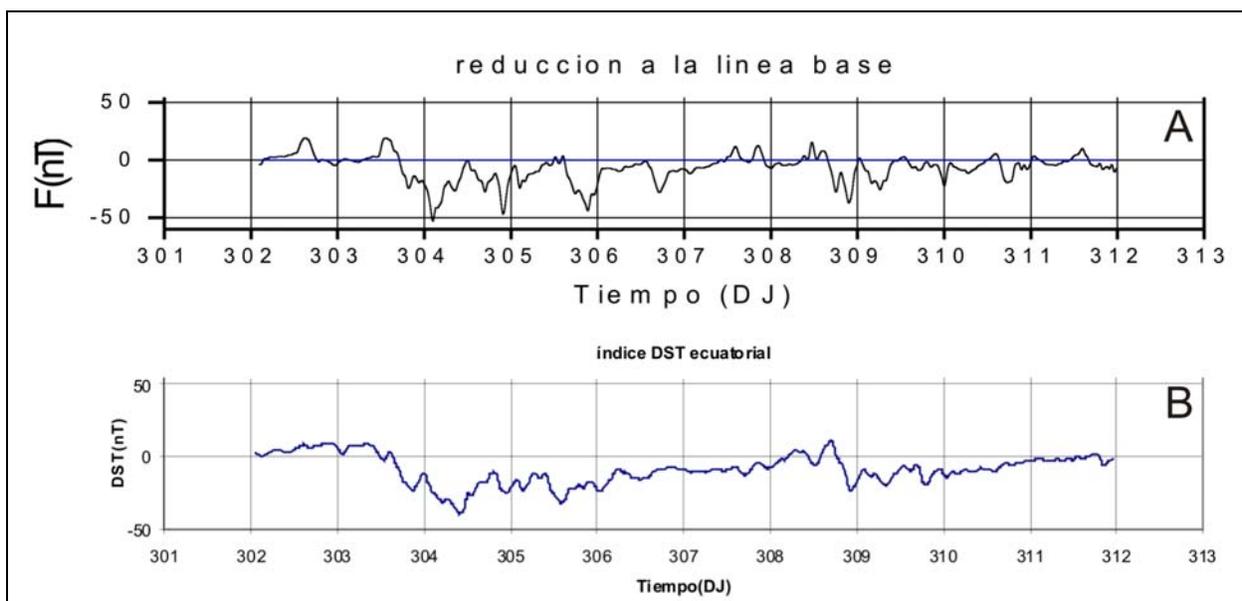


Figura 29. Graficas de la variación diurna relativa para los datos de la estación base de Manzanillo durante el crucero MARTIC04. A) Establecimiento del valor base para la variación diurna de la estación base de Manzanillo. B) Datos del DTS para el mismo periodo de tiempo.

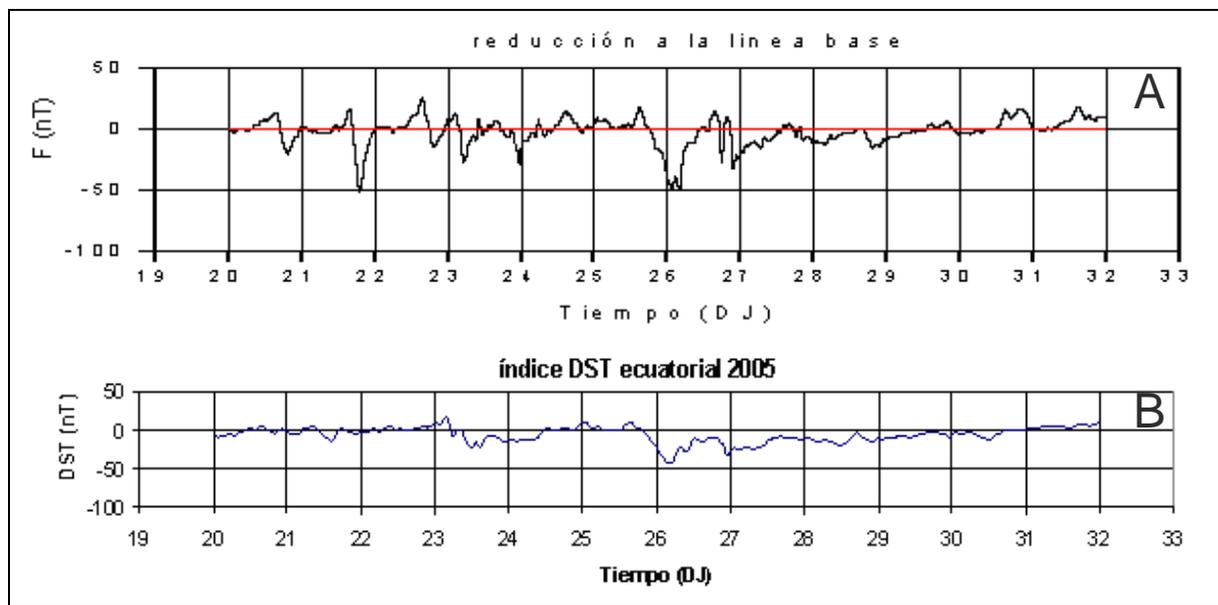


Figura 30. Graficas de la variación diurna relativa para los datos de la estación base de Chamela durante el crucero MARTIC05. A) Establecimiento del valor base para la variación diurna de la estación base de Chamela. B) Datos del DTS para el mismo periodo de tiempo.

La corrección por rumbo del buque está definida por la variación del campo magnético observado en los círculos de calibración respecto al rumbo del barco. Esta corrección para el crucero MARTIC05 se puede observar en la Figura 31 y para el crucero MARTIC04 en la Figura 32.

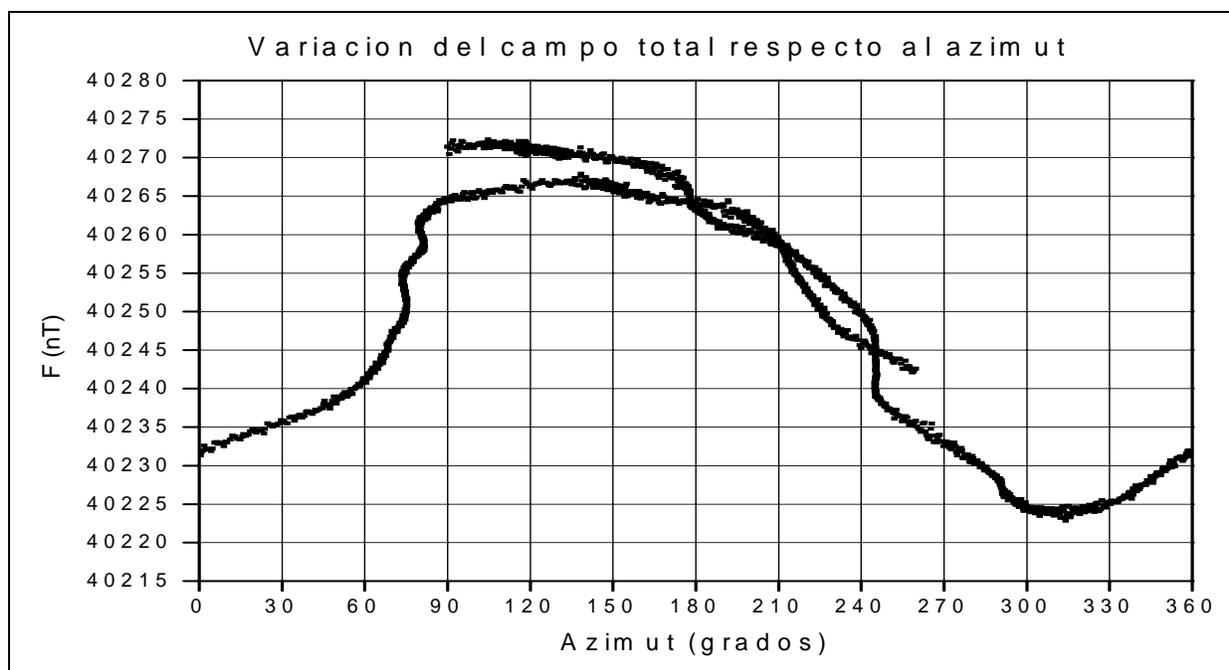


Figura 31. Grafica del [campo magnético total (F)] vs. [dirección del magnetómetro], en el círculo de calibración, para MARTIC05.

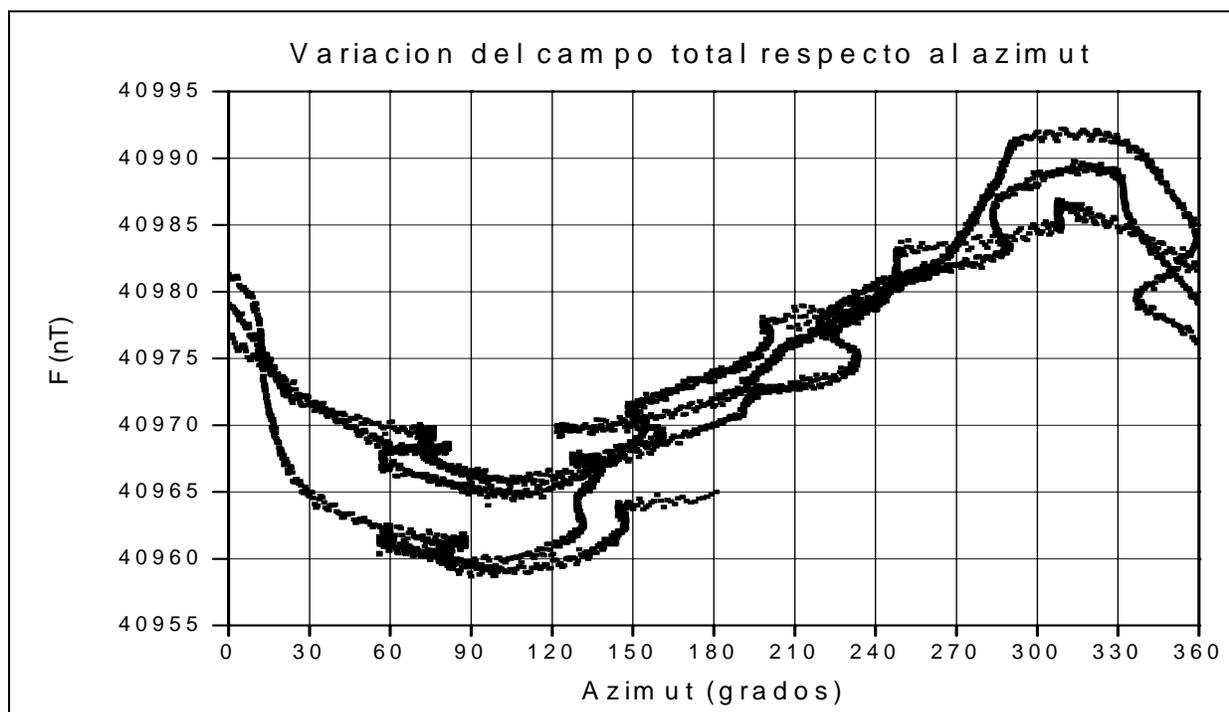


Figura 32. Grafica del [campo magnético total (F)] vs. [dirección del magnetómetro], en el círculo de calibración, para MARTIC04.

Los datos de los círculos de calibración fueron reducidos respecto al IGRF-10 y respecto a las variaciones diurnas, para realizar luego el ajuste mediante el método de *Buchanan et al.* [1996] y obtener las coeficientes C_0 , C_1 y C_2 . En las Figura 33 y 34 se muestran las series de datos respecto al rumbo del buque, y sus ajustes, para los datos correspondientes a los círculos de calibración de los cruceros MARTIC05 y MARTIC04.

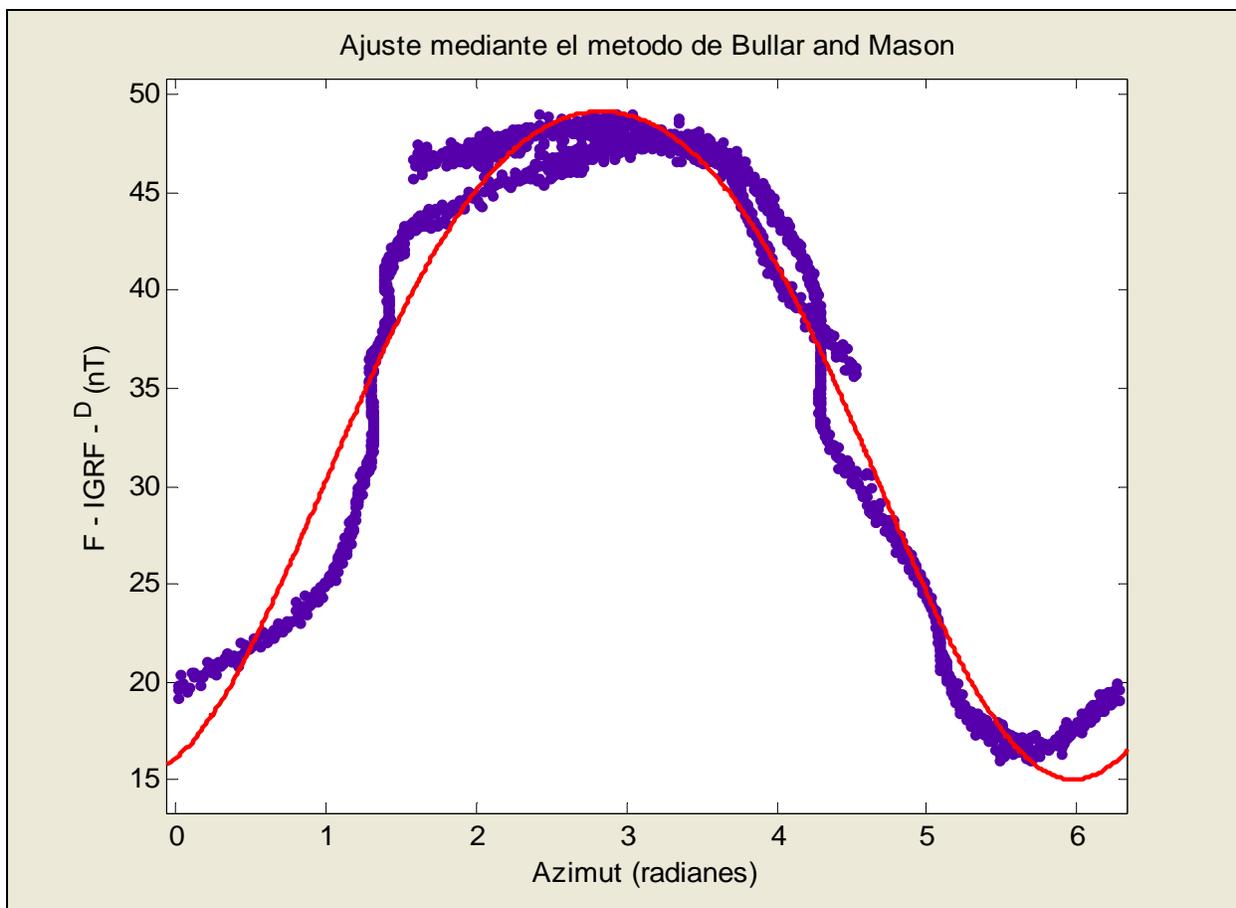


Figura 33. Grafica del [campo magnético total (F), menos (IGRF), menos (Δ diurna)] vs. [dirección del magnetómetro] en el círculo de calibración para MARTIC05. Ajuste realizado mediante e método de *Bullard and Mason* [1961].

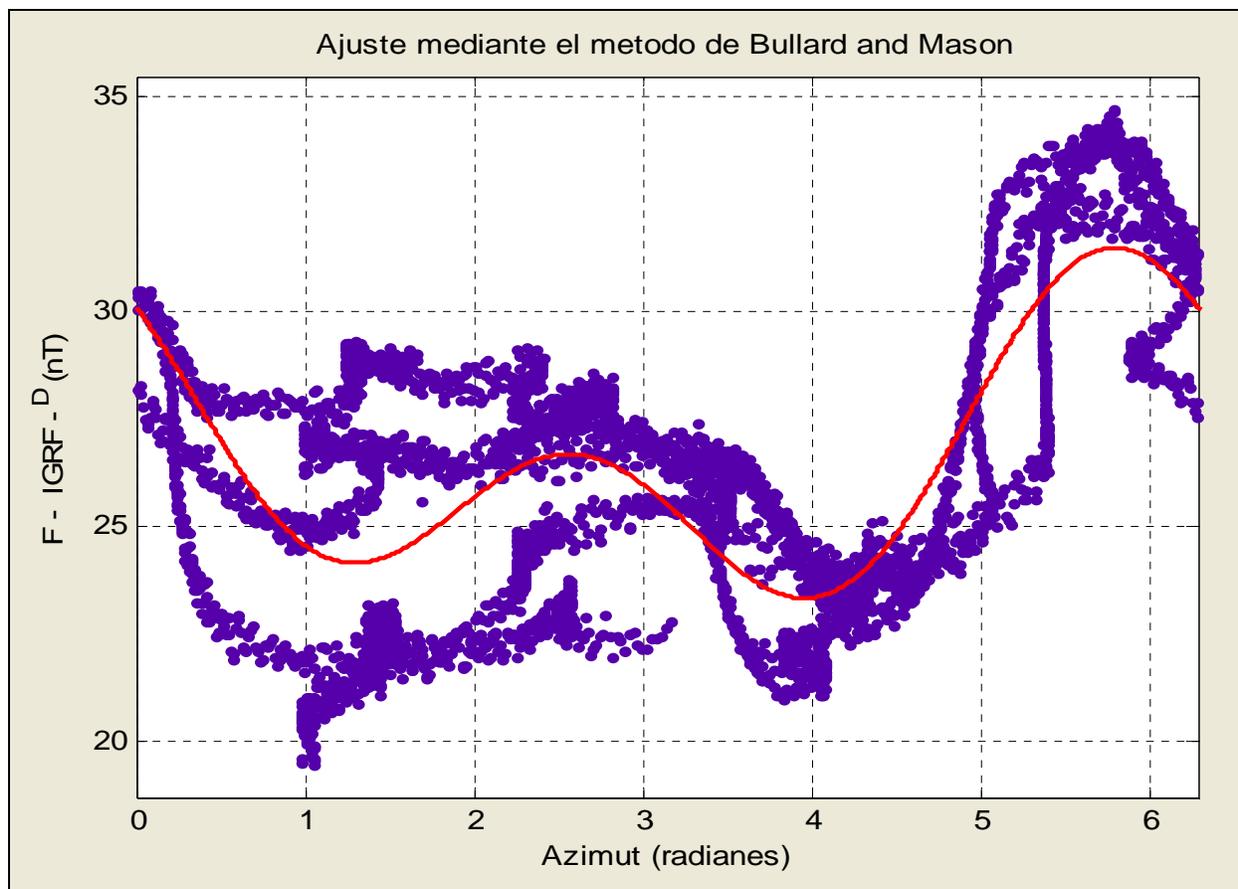


Figura 34. Grafica del [campo magnético total (F), menos (IGRF), menos (Δ diurna)] vs. [dirección del magnetómetro] en el círculo de calibración para MARTIC04. Ajuste realizado mediante e método de *Bullard and Mason* [1961].

Al igual que [*Buchanan et al.*, 1996] se calculó la influencia relativa del rumbo en los datos magnéticos observados para ambos cruceros, realizando una aproximación mediante el método de mínimos cuadrados con la forma de la ecuación dada por *Bullard and Mason* [1961]. De estas aproximaciones se calcularon los coeficientes de la ecuación para cada conjunto de datos en particular, teniendo:

$$\Delta F m_{\text{rumbo}}(\theta) = C_1 * \cos(\theta) + C_2 * \cos(2\theta) + S_1 * \text{sen}(\theta) + S_2 * \text{sen}(2\theta) + C_0. \quad (7)$$

Los coeficientes calculados con 95% de confianza para MARTI05 son:

$$C_1 = -16.28, \quad C_2 = -1.192, \quad S_1 = 5.112, \quad S_2 = 0.8287, \quad C_0 = 33.54.$$

Los coeficientes calculados Con 95% de confianza para MARTI04 son:

$$C_1 = 2.289, \quad C_2 = 1.264, \quad S_1 = -0.8363, \quad S_2 = -2.182, \quad C_0 = 26.53$$

Solo los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 del polinomio se usaron tal como se indica por *Bullard and Mason* [1961] para obtener las ecuaciones con las cuales se realizan las correcciones por rumbo $\Delta Fm_{rumbo}(\theta)$ para ambos cruceros, quedando:

$$\Delta Fm_{rumbo}(\theta) = -16.28 * \cos(\theta) + -1.192 * \cos(2\theta) + 33.54 \quad (8a)$$

Para MARTIC04

$$FittedModel(\theta) = 2.289 * \cos(\theta) + 1.264 * \cos(2\theta) + 26.53 \quad (8b)$$

Para MARTIC05

Estos polinomios representan unas curvas, que se utilizan para la corrección por rumbo de los datos magnéticos para MARTIC05 y MARTIC04. Estas curvas se normalizaron al valor correspondiente al norte (Figuras 35 y 36), en base a lo realizado por *Buchanan et al.* [1996].

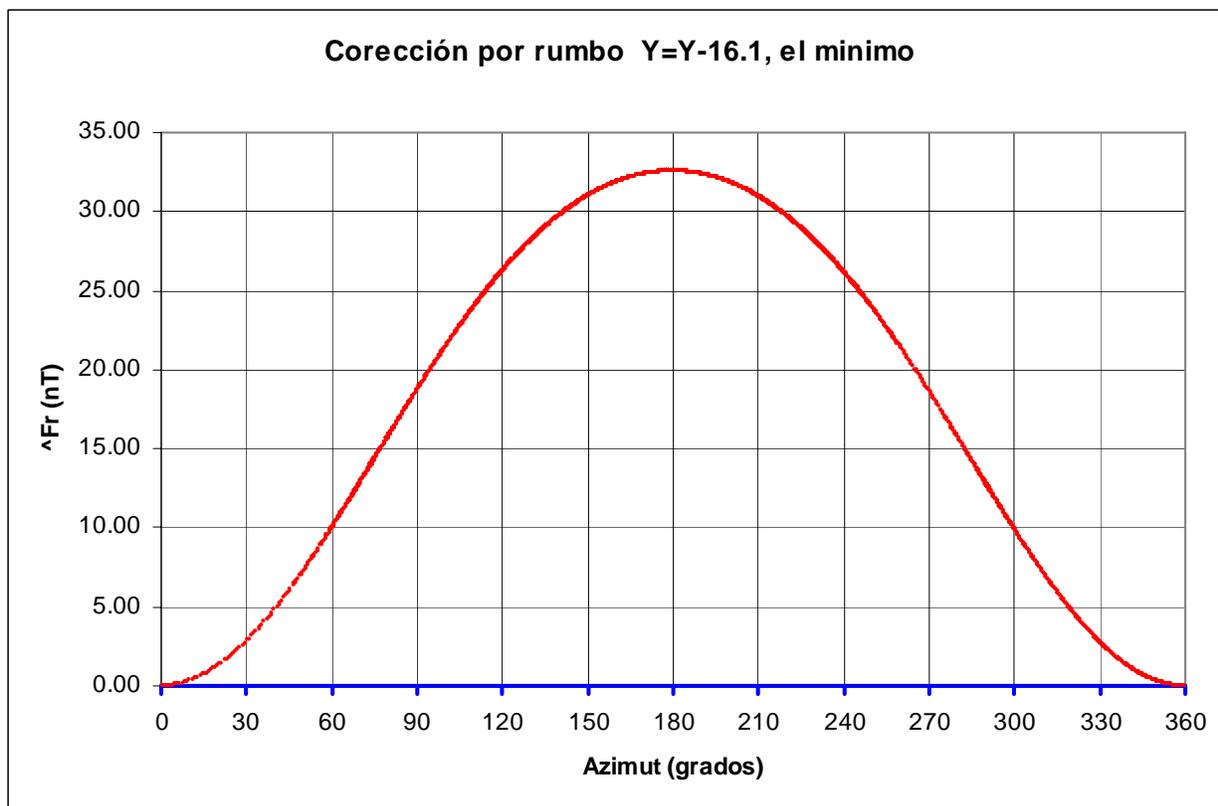


Figura 35. Curva normalizada que muestra la ecuación de ajuste obtenida para la corrección por rumbo según *Bullard and Manson* [1961], normalizada a su valor máximo para MARTIC05.

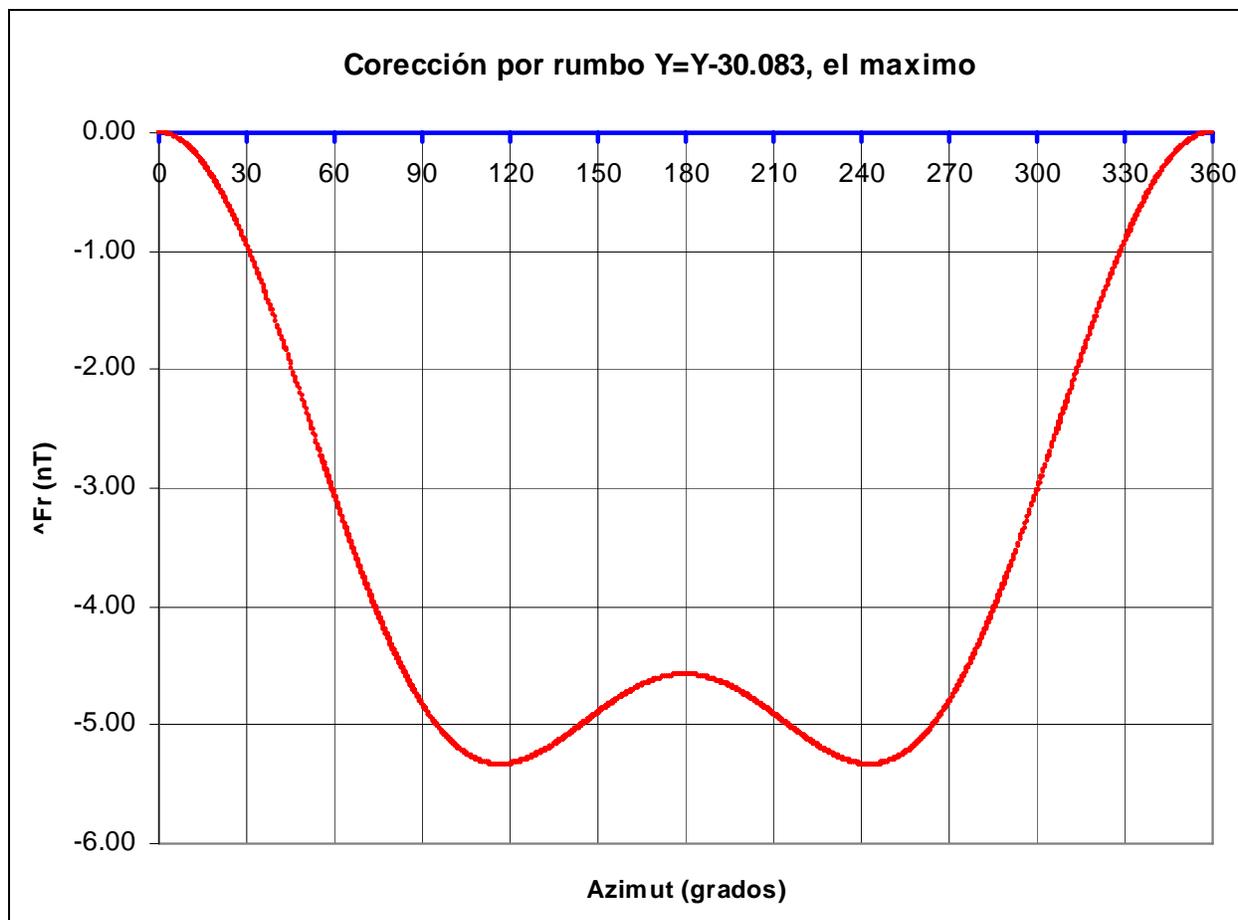


Figura 36. Curva que muestra la ecuación de ajuste obtenida para la corrección por rumbo según *Bullard and Manson* [1961], normalizada a su valor máximo para MARTIC04.

Luego de tener las respectivas correcciones en magnitud tanto para cada valor de tiempo en segundos de cada día, como para cada valor de rumbo en grados, se calcularon las anomalías magnéticas para cada conjunto de datos registrados en los cruceros MARTIC05 y MARTIC04.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados

Los principales resultados de este estudio se sintetizan en los mapas, morfológico y magnetométrico, complementados con el fechamiento de la muestra obtenida, los mecanismos focales y el modelo teórico de las anomalías magnéticas para la zona de estudio.

De los datos batimétricos mostrados anteriormente, se observa claramente, que los de alta resolución compilados y facilitados por el Dr. F. Michaud (datos no publicados, 2007) (Figura 17) son los que dan la mejor imagen de la morfología del suelo oceánico de la zona de estudio, gracias a su amplia cobertura y calidad. A estos datos batimétricos compilados se les realizó un manejo gráfico que permitiera una mejor y más fácil visualización de las estructuras, texturas y patrones texturales presentes en la morfología de la zona de estudio (Figura 37). Para tener un contexto de la morfología en su totalidad también se consideraron los datos de altimetría satelital del proyecto “Satellite Geodesy” de “Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego” disponibles en el sitio http://topex.ucsd.edu/WWW_html/mar_topo.html. Estos datos son usados para rellenar los lugares sin cobertura de datos batimétricos multihaz, realizándose así un mapa integral de la zona de estudio (Figura 38).

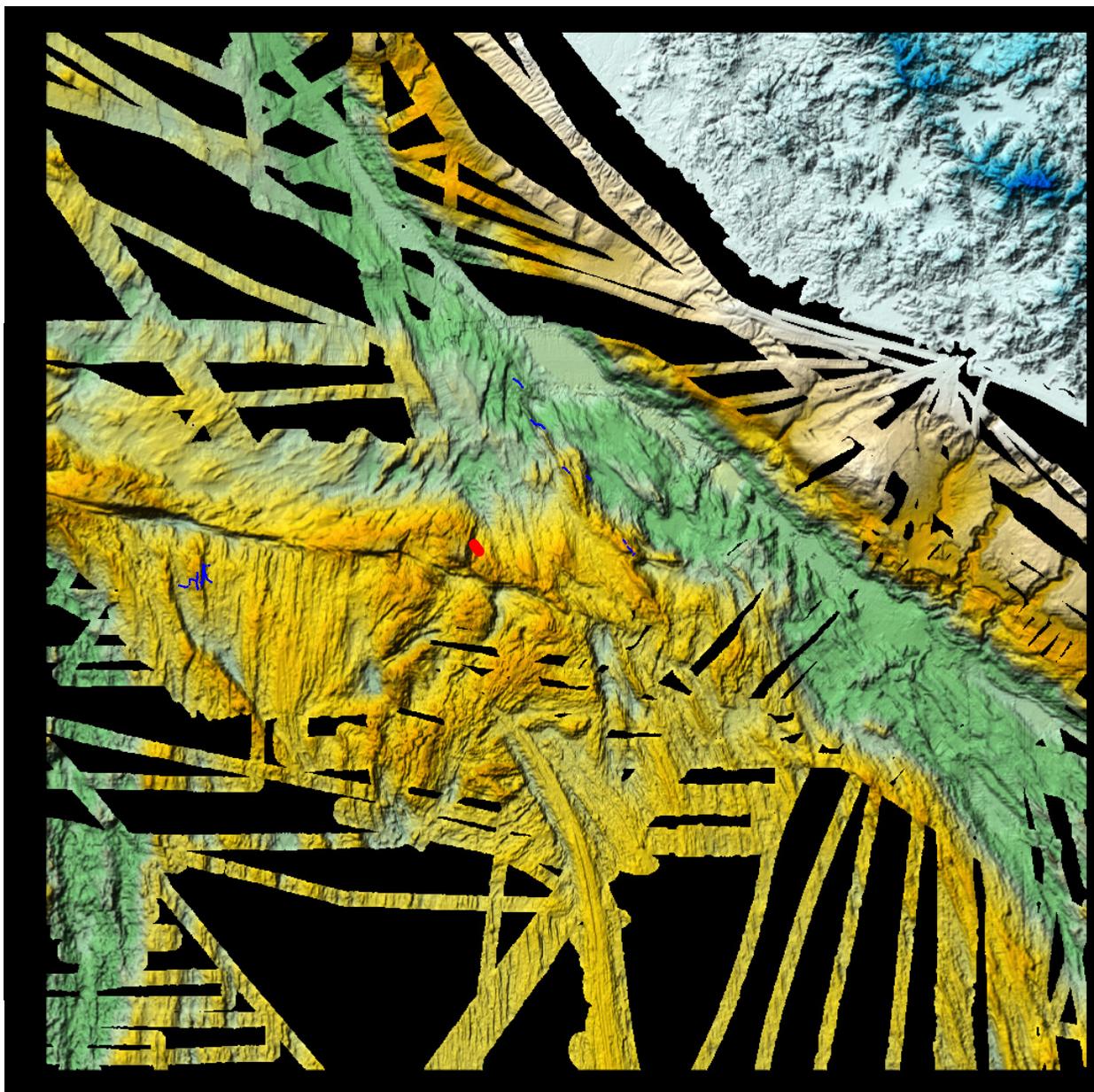


Figura 37. Mapa de la morfología de la zona de estudio realizado mediante un manejo gráfico especial, a partir de los datos batimétricos de alta resolución compilados y facilitados por el Dr. F. Michaud (datos no publicados, 2007). Los intentos de dragados (azul) y el sitio (en rojo) donde se logró sacar material de fondo.

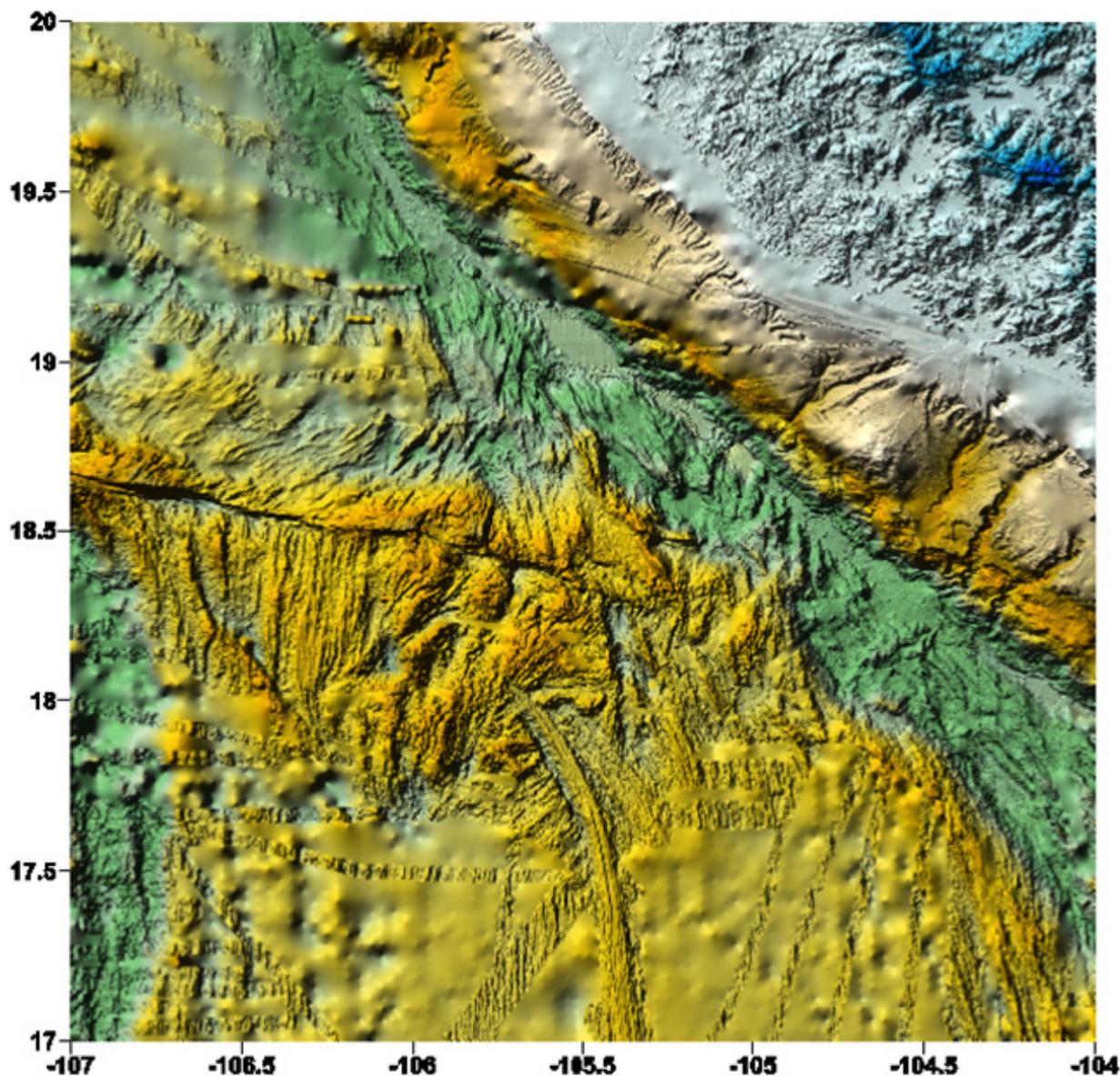


Figura 38. Mapa de la morfología de la zona de estudio realizado mediante un manejo gráfico especial a partir de los datos batimétricos de alta resolución compilados por el Dr. F. Michaud (datos no publicados, 2007) y los datos de altimetría satelital disponibles en http://topex.ucsd.edu/WWW_html/mar_topo.html, integrados de tal forma que se mantengan las dos resoluciones originales.

En los mapas de las Figuras 37 y 38 se pueden percibir a primera vista las principales estructuras mayores en el piso oceánico frente a las costas de Colima y Jalisco. Adicionalmente en la Figura 37 se muestran las zonas donde se realizaron los intentos de muestreo. En estos mapas se aprecia claramente la depresión ancha y grande relacionada con la trinchera MAT sub-paralela a la línea de costa. Al oeste de la

trinchera MAT, se observa una depresión muy estrecha y larga localizada en el medio del mapa de forma casi horizontal, denominada como el sistema de estructuras de la transformada RT {la transformada RT, la Zona de Fractura de Rivera (“Rivera Fracture Zone” o RFZ) y la Paleo–Transformada de Rivera (“Paleo Rivera Transform” o PRT)}. También en la parte central del mapa, en el relieve del piso oceánico se observan patrones texturales que representan segmentos de dorsales oceánicas asociados a centros de esparcimiento (EPR-PCS y MSS) y a propagadores tanto recientes como antiguos, (EPR-P1 y EPR-P2) y un alto grado de perturbación de la corteza oceánica.

La distribución de mecanismos focales de los sismos de las bases de datos USGS y HARVARD (Figura 39), muestran una buena correlación con el relieve del piso oceánico. La mayoría de los sismos presentan aproximadamente el mismo tipo de mecanismo focal, con tendencia a fallas transcurrentes, con planos nodales en direcciones N-S y E-W, presentando movimientos dextrolaterales y siniestrolaterales respectivamente. Es importante tener en cuenta que la posición de los sismos para esta zona tiene un error significativo por lo que solo se puede decir que la zona de estudio está siendo deformada por esfuerzos que inducen deformaciones transcurrentes.

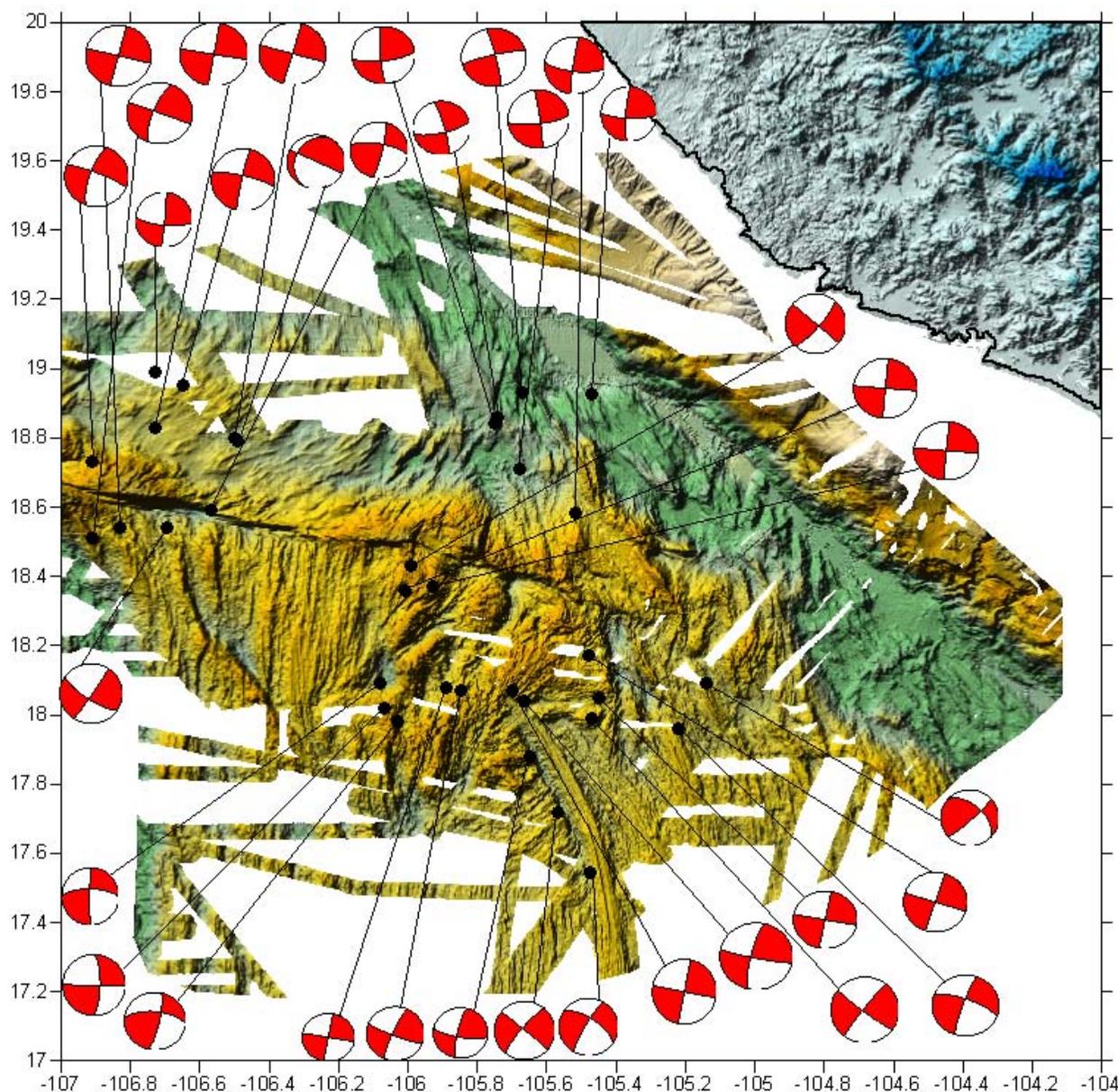


Figura 39. Mecanismos Focales seleccionados para la zona de estudio ilustrando su relación con la morfología. (Mecanismos Focales disponibles en el sitio <http://neic.usgs.gov/neis/sopar/> del "U.S. Geological Survey" (USGS) y en el sitio <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> de la Universidad de HARVARD).

Los datos magnetométricos procesados para este estudio aportan un mapa de alta calidad y resolución (Figura 40), que permite distinguir claramente las anomalías magnéticas marinas típicas. Adicionalmente también se percibe una zona con presencia de una fuerte anomalía magnética no lineal en dirección NE-SW cortando la

trinchera MAT al frente de Manzanillo, que aparentemente no posee relación con los centros de esparcimiento actuales.

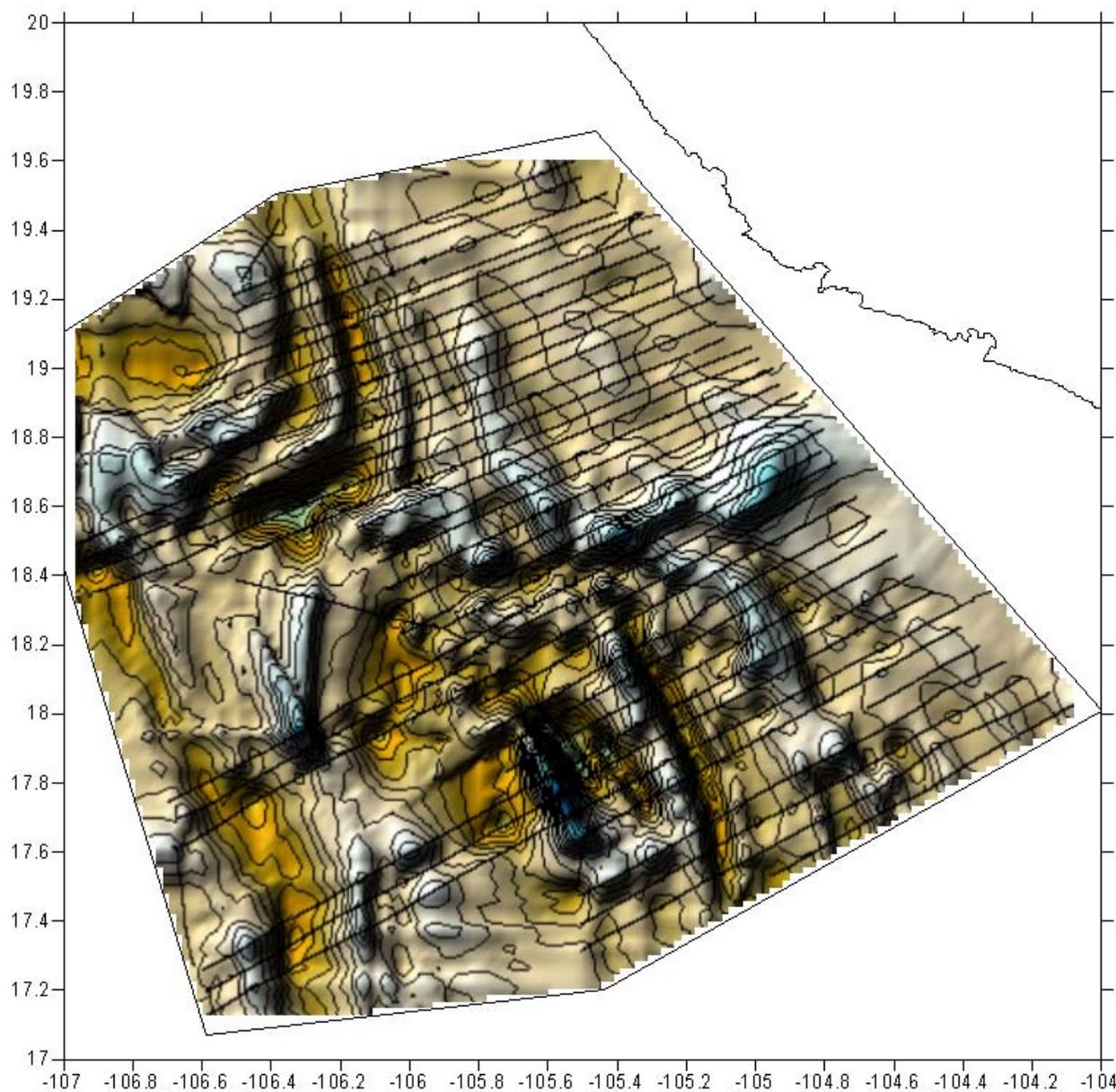


Figura 40. Mapa magnetométrico para la zona de estudio con los respectivos transectos de adquisición de los nuevos datos.

La edad del basalto recolectado ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; 1.4 Ma \pm 0.7 Ma) y un perfil A-A' de datos batimétricos y magnéticos obtenidos de la base de datos GEODAS del crucero identificado como 5PASC01WT se integran al mapa magnetométrico (Figura 41). De los perfiles magnéticos disponibles en la base de datos GEODAS se buscaron los que

estaban localizados al norte de la RT, ya que los perfiles localizados al sur han sido analizados por muchos otros autores desde *Klitgord and Mammerickx* [1982] en adelante. El perfil A-A' se seleccionó principalmente por tener navegación con GPS, por ser prácticamente perpendicular a las anomalías magnéticas y por ser lo suficientemente largo para tener desde las anomalías magnéticas más antiguas hasta las más recientes, pero sin entrar en la zona de perturbación. Se realiza un modelo teórico de anomalías magnéticas con los datos del perfil A-A' para calibrar el modelo teórico de las anomalías magnéticas. La edad de la muestra (1.4 Ma +/- 0.7 Ma) denota que el área donde se realizó el dragado es relativamente reciente. Estos datos y el modelo teórico permiten una interpretación del mapa magnetométrico más concordante con la realidad.

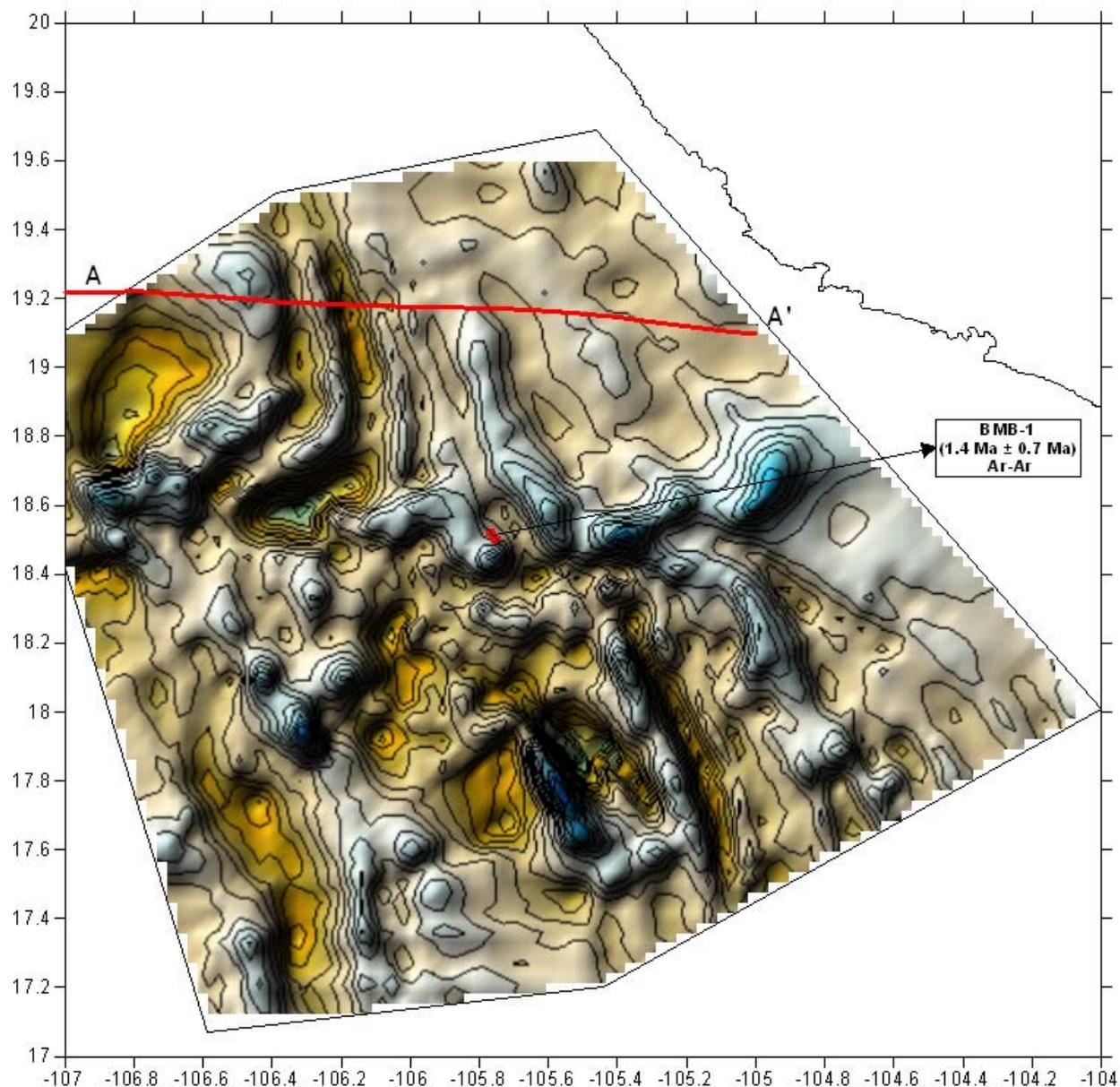


Figura 41. Localización del perfil A-A', que se usará para la comparación de las anomalías con el modelo teórico, y de la muestra fechada en el mapa magnetométrico para la zona de estudio.

Para estimar las tasas de esparcimiento adecuadas para la dorsal EPR en la posición del perfil A-A' se realizó un modelado teórico 2D de las anomalías magnéticas mediante el programa compilado por *J.L. LaBrecque* [1986] basado en el método de *Schouten and McCamy* [1972] usando la Transformada Rápida de Fourier en el filtrado de anomalías magnéticas marinas y la escala de tiempo magnética para el Cenozoico de *Cande and Kent* [1995]. Los datos del perfil A-A' (magnetométricos y batimétricos)

son comparados con un modelo teórico de las anomalías magnéticas a diferentes tasas de esparcimiento.

En el análisis para encontrar las anomalías magnéticas correspondientes entre los datos reales y el modelo teórico, se realizó una depuración de la tasa de esparcimiento ensayando con distintas tasas medias ("Half Spreading Rate" o HSR). En este proceso se presentaron inicialmente, discrepancias significativas en el modelo para ciertas tasas, hasta que finalmente se logró obtener una buena concordancia entre las anomalías reales y las del modelo teórico, tanto para una tasa de esparcimiento media de 44 mm/a (Figura 42), como para una tasa de esparcimiento alta de 63 mm/a (Figura 43). La primera coincide con una tasa de esparcimiento alta previamente aceptada por *Lonsdale [1995]*, *Bandy and Hilde [2000]*, *DeMets and Traylen [2000]* para el esparcimiento oceánico de la dorsal EPR en el periodo de tiempo (0 – 5 Ma) que se está analizando; y la segunda con una tasa de esparcimiento media, pero más concordante con la velocidad actual del desplazamiento de la placas involucradas [*DeMets et al, 1994; Bandy et al., 2000; DeMets and Traylen, 2000*]. Sin embargo, para poder realizar la correspondencia entre las anomalías reales y el modelo, se debe escoger la tasa de esparcimiento más adecuada, pero como no se tienen fechamientos cercanos al perfil, se optó por la tasa de esparcimiento alta previamente aceptada, de 63 mm/a (Figura 43).

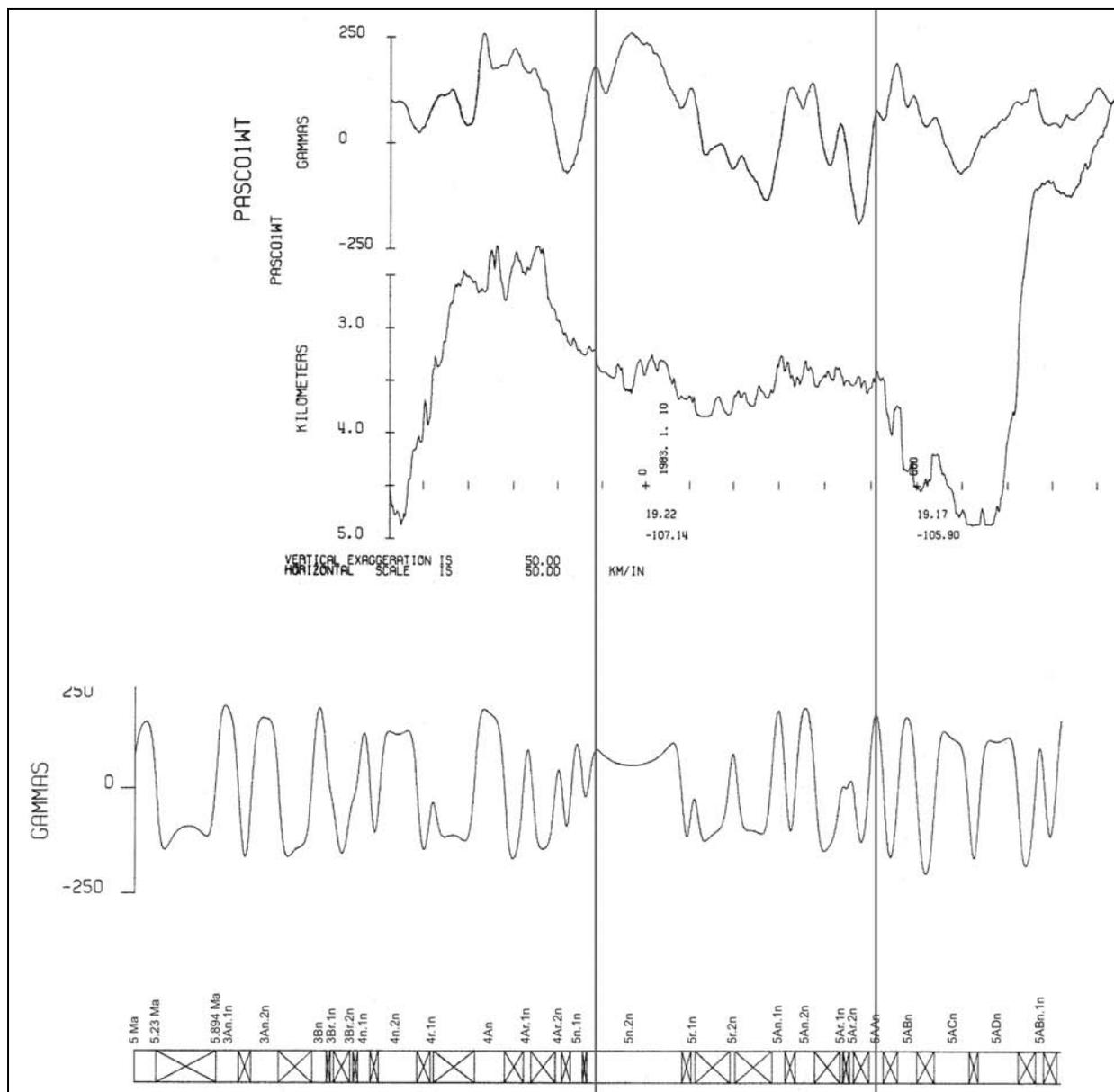


Figura 42. Comparación entre la magnetometría y batimetría reales para el perfil A-A' contra el modelo teórico de las anomalías magnéticas a una tasa HSR de 44 mm/a.

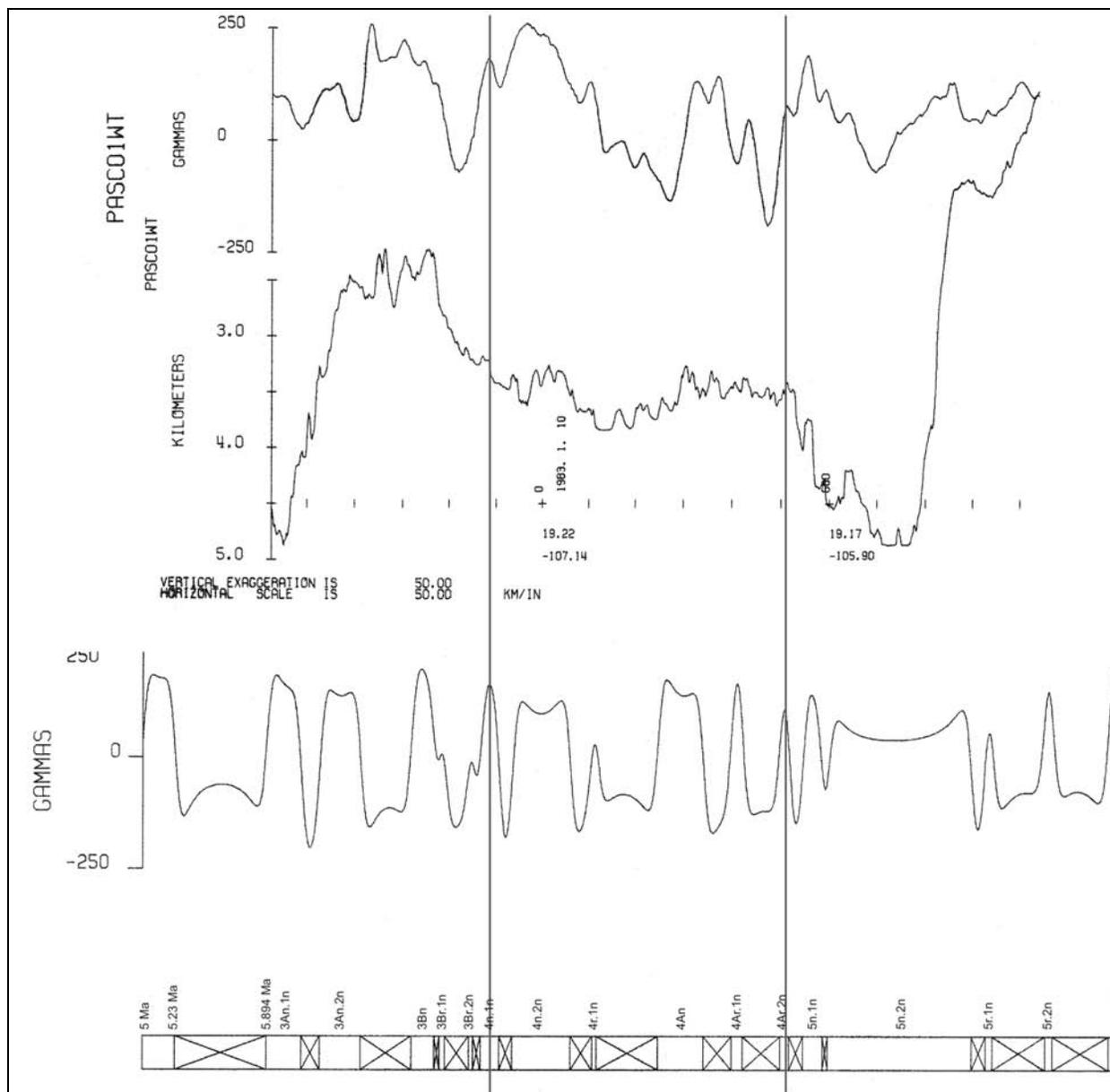


Figura 43. Comparación entre la magnetometría y batimetría reales para el perfil A-A' contra el modelo teórico de las anomalías magnéticas a una tasa HSR de 63 mm/a.

4.2. Interpretación de los resultados

El análisis de los principales resultados obtenidos y de los estudios anteriores permite identificar detalladamente las estructuras y las anomalías magnéticas presentes en la zona de la intersección entre la trinchera MAT, los segmentos de las dorsales EPR-PCS y MSS, y la zona de transformadas RT, RFZ y PRT (Figura 44). Adicionalmente se pudieron identificar con claridad otras estructuras de menor escala. Para la interpretación adecuada del mapa magnetométrico, se consideran todos los resultados principales y complementarios analizados en conjunto.

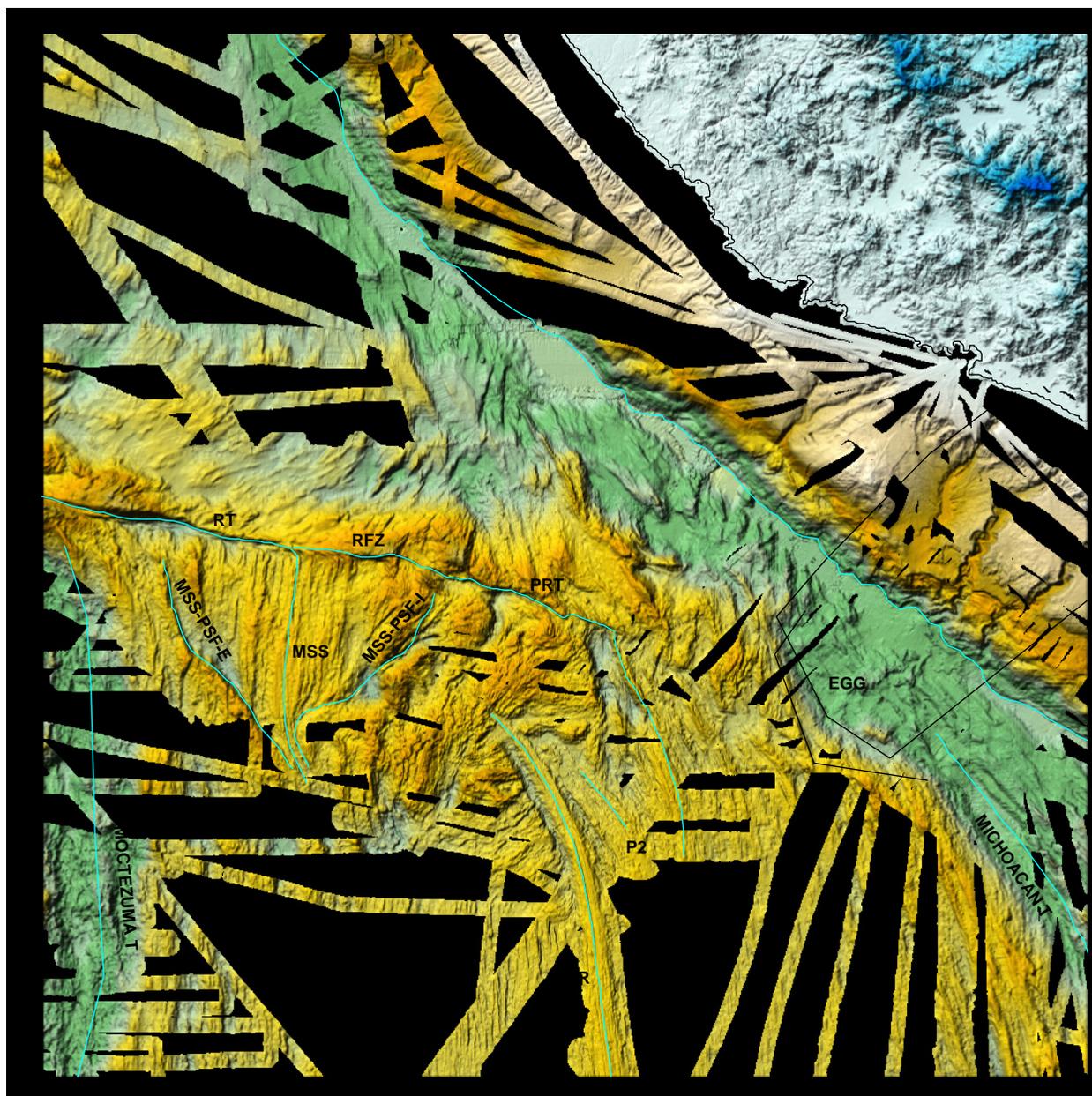


Figura 44. Estructuras morfo-tectónicas principales y su relación con la morfología. Las abreviaciones son: RFZ = Zona de Fractura de Rivera; MSS-PSF-E = Pseudo-Falla Externa del MSS; MSS-PSF-I = Pseudo-Falla Interna del MSS; EPR-P1 y EPR-P2: propagadores 1 y 2. Ver figura 2 para las demás abreviaciones.

El relieve de la estructura del EGG en el margen occidental de México frente a las costas de Colima, fue identificado por *Bourgeois et al.* [1988]. Adicionalmente *Bandy et al.* [1995, 2000] y *Serrato-Díaz et al.* [2004] lo definieron principalmente a partir de datos gravimétricos, de flujo de calor y a partir de la geometría derivada de la sismicidad. Aun así, ni estos datos son conclusivos, ni los datos obtenidos en este

trabajo aportan suficientes evidencias para indicar que el EGG esté activo actualmente, ya que los límites geológico-estructurales no se presenten claros, ni abruptos, ni bien definidos (Figura 44) y las evidencias tanto gravimétricas como de flujo de calor pueden estar relacionadas con actividad reciente que ya pudo haber terminado.

Teniendo en cuenta que *Bandy et al.* [1995, 2000] y *Serrato-Díaz et al.* [2004] han planteado al EGG como el límite entre las placas de RIV y COC, se consideran dos hipótesis. (1) que el EGG es un antiguo graben que hace parte de la combinación entre la trinchera MAT y la Depresión de Michoacán “Michoacán Trough” tal como lo propone *Demets and Wilson* [1997]. (2) considerando las evidencias presentadas por *Bandy et al.* [1995, 2000] y *Serrato-Díaz et al.* [2004] aunque no son conclusivas se piensa, tal como los autores lo proponen, que el EGG es la prolongación del “Southern Colima Graben” (SCG), pero a diferencia de estos, se cree que el EGG no se encuentra activo actualmente. Las consecuencias de estas hipótesis se trataran mas adelante.

Otros estudios geológicos adicionales se requieren para detallar el EGG sus límites. Un estudio marino usando un perfilador de sedimentos de alta resolución de reflexión sísmica podría proporcionar datos geológicos de la evolución de este graben y sus límites.

La Depresión de Moctezuma “Moctezuma Trough” y la Depresión de Michoacán, son mostradas parcialmente en el relieve oceánico de la Figura 44. Estas depresiones son dos grandes cuencas oceánicas alargadas en forma de valle, que se ubican a ambos lados del sector sur de la zona de estudio. La Depresión de Moctezuma ubicada en el flanco izquierdo ha sido perfectamente identificada en toda su extensión en diversos estudios anteriores [*Mammerickx et al.*, 1988; *DeMets and Wilson*, 1997; *Michaud et al.*, 2000; *Bandy and Hilde*, 2000]. La Depresión de Michoacán en su tramo más al norte no puede definirse con claridad y tampoco es fácil discriminarla en el sector en que se aproxima a la depresión del graben EGG. Los elementos estructurales en esta zona son tan complejos que *Michaud et al.* [2000, 2001] propuso que la Depresión de Michoacán está subduciendo bajo la trinchera MAT al norte del graben EGG, mientras

que *Lonsdale* [1995] y *DeMets and Wilson* [1997] propusieron que la Depresión de Michoacán sí se encontraba más al norte pero sin alcanzar la MAT, aunque si fue afectada por los procesos que generaron el graben EGG. Actualmente, en dicha zona, no se ha definido si estas últimas estructuras están separadas o entremezcladas.

El resto de estructuras de mayor escala son apreciadas claramente en la Figura 44 gracias a la buena calidad y cantidad de los datos de batimetría multihaz. La trinchera MAT se observa como una gran depresión que presenta tramos con cuencas amplias sin estructuras semienterradas y tramos con cuencas estrechas cortadas por montes submarinos, escarpes y pequeñas cordilleras submarinas semienterradas que sobresalen del lecho sedimentario. También se observa claramente la posición actual del segmento de la dorsal EPR-PCS y los distintos propagadores anteriores de esta dorsal. Adicionalmente en la Figura 44 se observa el Sistema de la Transformada de Rivera que está conformado por 3 tramos: el primero de izquierda a derecha es la transformada RT, que constituye actualmente la zona activa del sistema con un movimiento relativo dextralateral; el tramo de en medio es la zona de fractura RFZ, producto de la reciente actividad de la transformada RT, pero en su sector no transformante presenta una deformación plástica lateral; y el último tramo es la paleo transformada PRT, la cual es la zona del sistema que actualmente se encuentra inactiva. Estos tramos en conjunto se pueden discriminar claramente ya que conforman una estructura lineal que está separando cortezas oceánicas que tienen diferente patrón textural. También este mapa morfológico (Figura 44) presenta zonas geológico-tectónicas con diferentes patrones texturales en su relieve oceánico, como zonas de corteza oceánica nuevas sin deformar, zonas de corteza oceánica antiguas parcialmente deformadas y zonas de alta deformación entre las principales estructuras.

La Figura 45 es un esquema de las zonas geológico-tectónicas identificadas: (A) Zonas de generación de corteza oceánica reciente no deformadas, relacionadas a los centros de esparcimiento (EPR-PCS y MSS) y a los propagadores (EPR-P1 y EPR-P2) y presentan un patrón textural paralelo a las dorsales. (B) Una zona de corteza oceánica deformada incipientemente que está relacionada al segmento de la dorsal EPR-PRS y

además muestra curvaturas poco pronunciadas en el patrón textural del relieve denotando así el tipo de deformación. (C) Una zona de corteza oceánica reciente no deformada que se encuentra entre la depresión MAT y la zona (B) que se relaciona con un propagador del EPR-PCS que posiblemente sobrepasó la posición actual de la paleo transformada PRT, posibilidad que se refuerza gracias a la edad de la muestra (1.4 Ma +/- 0.7 Ma). La gran depresión relacionada con la trinchera MAT que se puede subdividir en tres tramos, (D-1) dos de ellos iguales pero no continuos con cobertura de sedimentos relativamente amplia, sin presencia de estructuras que sobresalgan dentro de su cobertura sedimentaria, y una zona con una cobertura de sedimentos estrecha, cortada por montes submarinos, escarpes y pequeñas cordilleras submarinas que sobresalen de la cobertura sedimentaria (D-2), en la que se encuentra un escarpe con un patrón sinusoidal o con un patrón en echelon que aparentemente pasa desde la corteza oceánica hacia la corteza continental que en este estudio llamaremos Escarpe de Manzanillo ("Manzanillo Scarp" o MSc). (E) Una zona relacionada con el graben EGG, que se encuentra en parte dentro de la gran depresión de la trinchera MAT en su tramo mas al sur y sobresale un poco, deformando lo que sería corteza oceánica reciente. (F) Zonas de depresión relacionadas a los primeros eventos de propagación, que se encuentran al sur de la RT. (G) Zonas de alta deformación de corteza oceánica relacionadas con las zonas de traslape de centros de esparcimiento OSS, que se encuentran entre dichos OSS o entre un propagador y la trinchera MAT, mostrando patrones texturales que denotan deformación tanto compresional como rotacional. (H) La zona de la corteza continental que está conformada por la plataforma y el talud continental, la cual se encuentra hacia el oriente de la trinchera MAT y presenta grandes diferencias morfológicas en la rugosidad de la corteza oceánica.

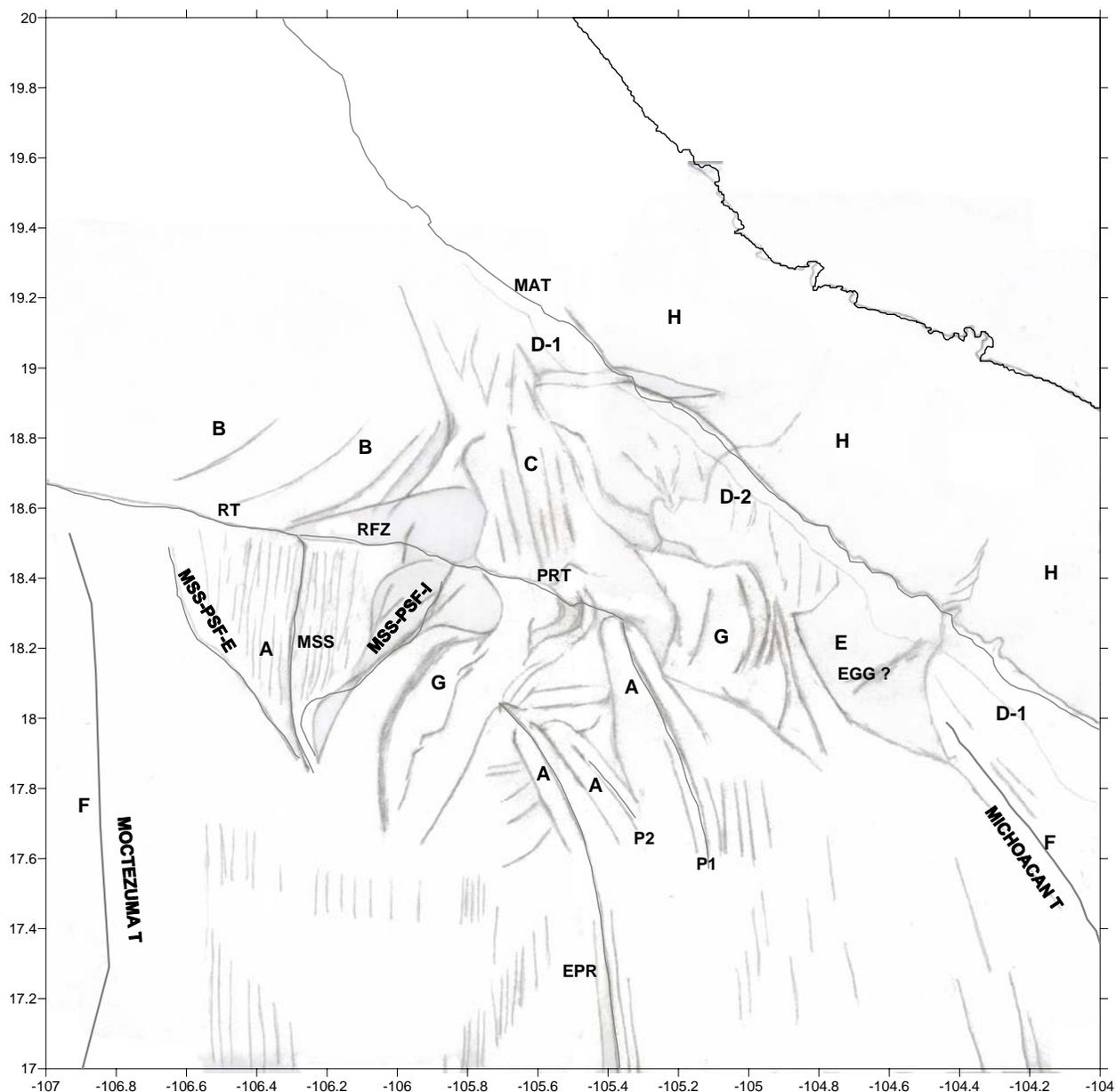


Figura 45. Esquematización de los diferentes tipos de zonas tectónicas presentes en el área de estudio y las estructuras principales. (A) Zonas de generación de corteza oceánica reciente no deformadas; (B) Zona de corteza oceánica deformada incipientemente; (C) Zona de posible generación de corteza oceánica reciente no deformada; (D-1) Depresión relacionada con la trinchera con cobertura de sedimentos relativamente amplia sin presencia de estructuras que sobresalgan; (D-2) Depresión relacionada con la trinchera con una cobertura de sedimentos estrecha, cortada estructuras que sobresalen de la cobertura sedimentaria; (E) Depresión relacionada con el EGG; (F) Depresiones relacionadas con los eventos de propagación; (G) Zonas de alta deformación de corteza oceánica relacionada con las zonas OSS; (H) Corteza continental: plataforma y talud continental. Ver Figuras 2 y 4 para las demás abreviaciones.

El análisis en conjunto de los mapas morfológico (Figura 37) y magnetométrico (Figura 40) proporciona la definición de algunas de las estructuras originadas por diferentes sistemas de esparcimiento (EPR-PCS y MSS) y sus propagadores (EPR-P1 y EPR-P2), que no eran posibles de identificar solo a partir del relieve del piso oceánico. El mapa magnetométrico (Figura 46) proporciona la relación entre estas estructuras y su firma magnética. Dichas estructuras fueron identificadas debido a que irrumpen sobre la corteza oceánica anterior, imponiendo una nueva corteza con un patrón textural completamente diferente y deformando el patrón textural de la corteza anterior, al igual que alterando los patrones de los lineamientos magnéticos.

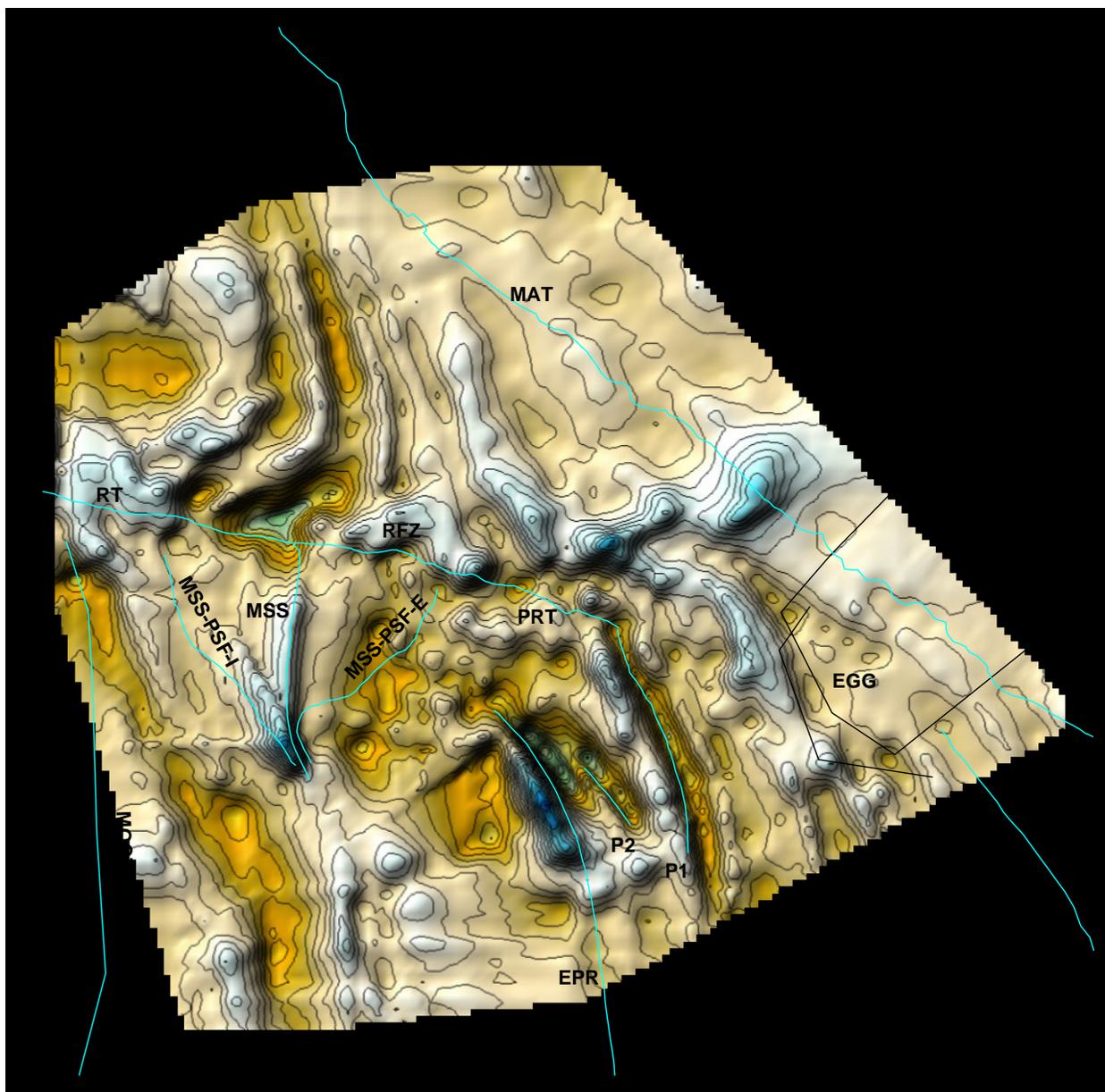


Figura 46. Estructuras principales asociadas con el mapa magnetométrico. Ver Figuras 2 y 44 para las abreviaciones.

Los eventos de propagación de centros de esparcimiento tienen una característica especial, la cual consiste en que el centro morfológico del propagador se alinea con una anomalía magnética positiva de gran amplitud [Sclater *et al.*, 1971]. En la zona de estudio se puede identificar al menos 1 evento de propagación (MSS) de este tipo, el cual posee además una anomalía lateral que puede estar asociada a la propagación hacia el sur (Figura 46). Otros 3 eventos de propagación (EPR-PCS, EPR-P1 y EPR-P2) están presentes pero no poseen esta característica. Estos 3 eventos tienen de

particular que la posición de la dorsal se ubica en la línea de inflexión entre una anomalía positiva y una negativa (Figura 46). Posiblemente estos eventos no alcanzaron a desarrollar la firma magnética característica.

Si estos eventos de propagación se analizan del más antiguo al más reciente (EPR-PCS), se observa en el primero (EPR-P1), que la dorsal y su correspondiente anomalía central no están alineadas (Figura 46). Además se observa la presencia de una anomalía J a la izquierda del propagador, y una anomalía R seguida por una J a la derecha de la dorsal, indicando que estos propagadores poseen una firma magnética asociada con un sesgo respecto a la posición de la dorsal, o sea que no son simétricos aunque tengan el suficiente tiempo para desarrollarse.

El siguiente propagador (EPR-P2), es evidente que está presente, ya que se puede observar tanto en el mapa morfológico como en el mapa magnetométrico. El propagador EPR-P2 es un sistema con menor tiempo de desarrollo y menor longitud, y muestra de manera significativa una anomalía magnética bipolar de gran amplitud magnética, estrecha y sesgada respecto a la posición central del propagador ya que se ubica en la línea de inflexión magnética (Figura 46).

El último propagador que hace parte del extremo norte del segmento de la dorsal EPR-PCS está generando actualmente nueva corteza oceánica, presenta una anomalía bipolar de gran amplitud magnética, estrecha y sesgada, bastante clara ya que se desarrolla longitudinalmente (Figura 46). Al igual que en los anteriores, el propagador EPR-PCS, se ubica en la línea de inflexión. En las Figuras 47 y 48, se pueden observar al lado izquierdo de la EPR-PCS las anomalías R y J, que habían sido identificadas en estudios anteriores [e.g., *Klitgord and Mammerickx, 1982; Mammerickx et al., 1988 y Bandy and Hilde, 2000*]. Pero estas anomalías no presentan una correspondencia clara con los datos magnéticos de la presente investigación, aunque se trate de una zona donde no hay perturbación de la corteza oceánica.

Al analizar el mapa magnetométrico con las anomalías magnéticas identificadas por otros autores, en ciertos casos no es fácil determinar cuál es la anomalía magnética correspondiente respecto a la escala teórica, tal como se puede observar en la Figura 47. En este mapa, las líneas en negro muestran las anomalías magnéticas definidas por interpretaciones previas, las líneas en verde son las anomalías magnéticas que se pueden identificar con claridad a partir de los datos de este estudio, mientras que las líneas de colores amarillo y naranja son posibles anomalías y/o posibles variantes de ciertas anomalías, y los contornos en violeta y azul representan la base de ciertas anomalías magnéticas puntuales aparentemente aisladas y no relacionadas directamente con el esparcimiento oceánico. Sin embargo para el caso de la mayoría de las anomalías que se encuentran por encima del Sistema de la Transformada de Rivera, presentan una curvatura (Figura 47) que corresponde a la deformación de la corteza oceánica que se observa en el mapa morfológico (Figura 37). En el sector sur del área de estudio se identifican anomalías magnéticas no deformadas, típicas de esparcimiento oceánico. En este caso podemos ver como las anomalías identificadas por interpretaciones anteriores continúan en general hacia el norte sin deformación (Figura 47), hasta que llegan a los sistemas de propagadores o hasta que se encuentran con alguna depresión tectónica como el graben EGG o las depresiones de Michoacán o de Moctezuma. Además en el mapa magnetométrico (Figura 47) se observa un conjunto de anomalías que no presentan evidencia de su correlación con el relieve del piso oceánico. Estas anomalías son las que están ubicadas en el lado oriental del área de estudio entre la trinchera MAT y la paleo transformada PRT. Si se analizan con más cuidado, teniendo en cuenta la edad de la muestra (1.4 Ma \pm 0.7 Ma), los estudios anteriores y las posibles estructuras geológico-tectónicas, que pudieran dar origen a estas anomalías magnéticas, se tiene que una de estas anomalías magnéticas (Línea roja 1C, en la Figura 47) presenta una tendencia sub-vertical y su amplitud decrece de sur a norte. La edad de la muestra (1.4 Ma \pm 0.7 Ma) permite relacionar esta anomalía con un sistema de propagación que superó la posición actual de la paleo transformada PRT, ya que la nueva corteza oceánica generada por este centro de esparcimiento es concordante con la edad de la muestra.

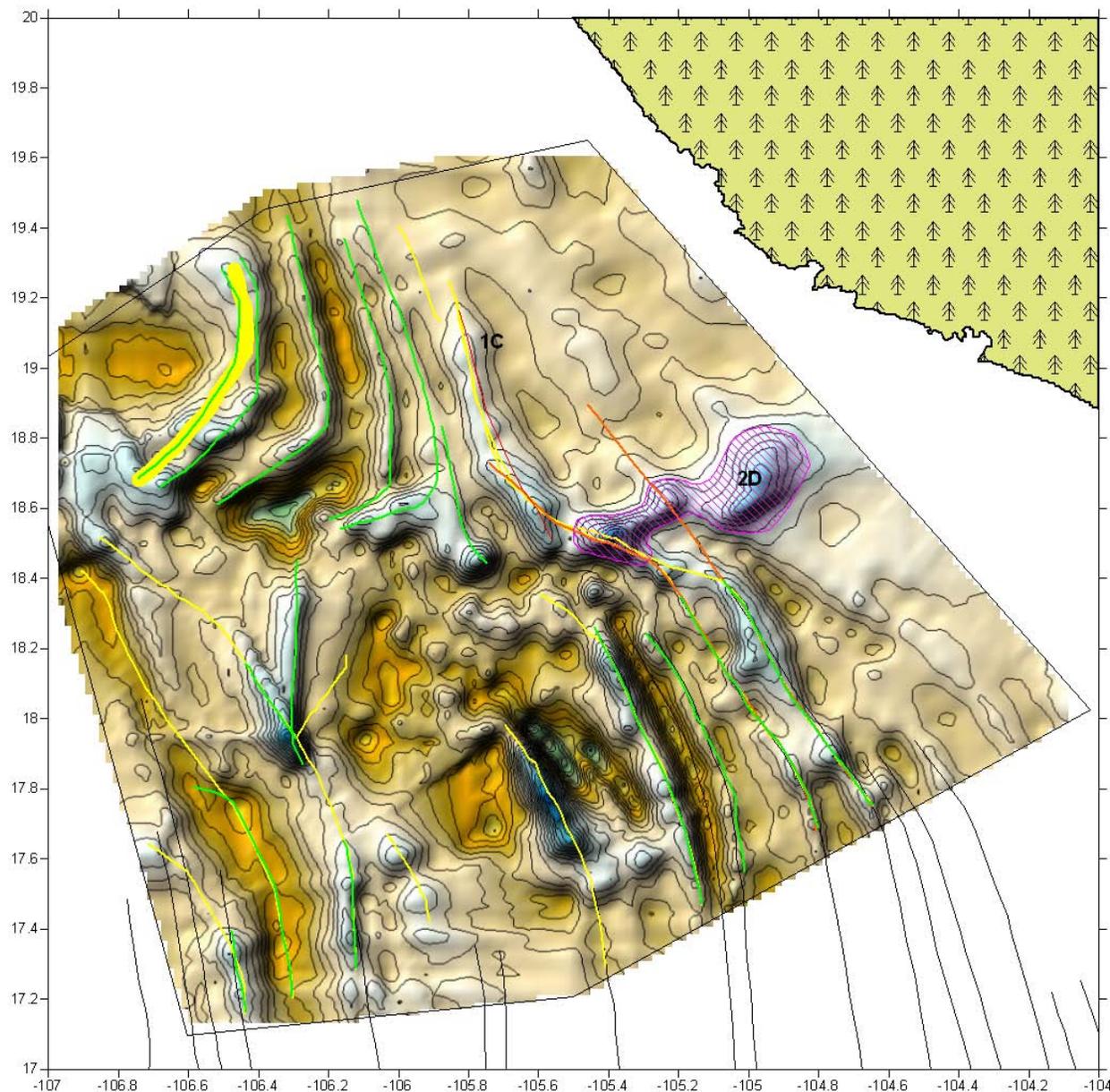


Figura 47. Mapa magnetométrico con las posibles anomalías magnéticas a identificar. (1C y 2D) anomalías magnéticas extrañas. (Líneas en negro: anomalías magnéticas definidas por interpretaciones previas; líneas en verde: anomalías magnéticas identificadas con claridad a partir de los datos de este estudio; líneas de colores amarillo y naranja: posibles anomalías y/o posibles variantes de ciertas anomalías; contornos en violeta y azul: anomalías magnéticas puntuales aparentemente aisladas y no relacionadas directamente con el esparcimiento oceánico)

Otra anomalía difícil de explicar (Área rallada 2D, en la Figura 47) es la que se encuentra entre la paleo transformada PRT y la trinchera MAT pero con tendencia sub-horizontal y no totalmente lineal, que se presenta como un conjunto de tres altos magnéticos consecutivos. Esta anomalía coincide con la zona D-2 y puede interpretarse como una zona de alta deformación en un espacio reducido.

En general se puede decir que hay una clara y precisa correspondencia en la mayoría de las estructuras mayores entre el mapa morfológico y las anomalías magnéticas claramente identificadas en el mapa magnetométrico (Figura 48).

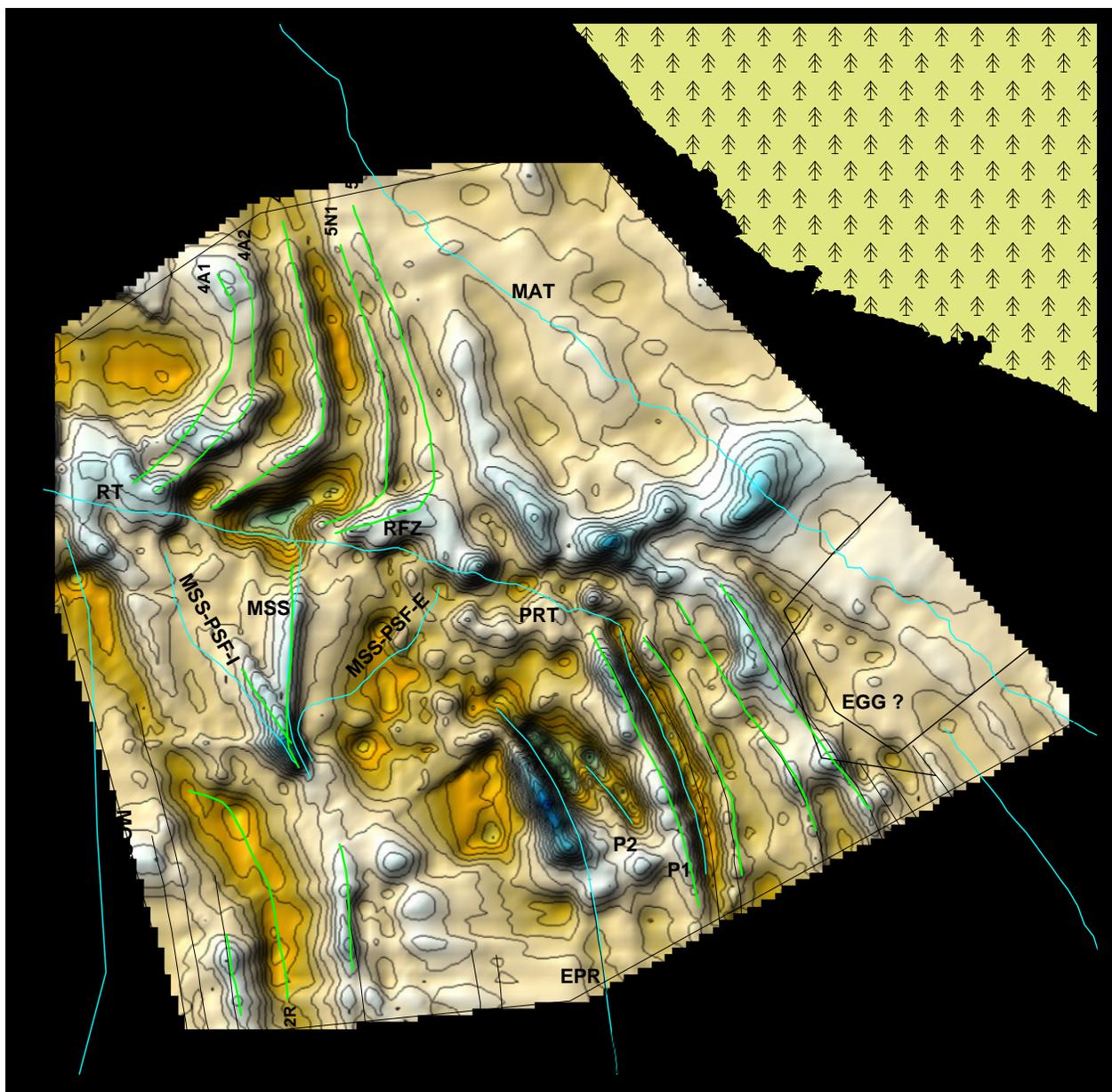


Figura 48. Mapa de anomalías magnéticas relacionadas con las con las estructuras principales. Las anomalías magnéticas marinas perfectamente determinadas están identificadas con sus nombres. Ver Figuras 2 y 44 para las abreviaciones.

4.3. Síntesis de los resultados

En síntesis en el análisis de los resultados se identifican y caracterizan claramente los siguientes elementos magnético-geológico-tectónicos (Figura 49): Las anomalías magnéticas marinas recientes (C.A – 3_1) prácticamente sin deformación, que presentan buena concordancia con la morfología del piso oceánico, ya que estas muestran un patrón textural que no denota deformación (A). Las anomalías magnéticas parcialmente deformadas (4A1 – 5N2), que presentan también buena concordancia con la morfología del piso oceánico ya que tiene un patrón textural que denota una deformación incipiente (B). Los sistemas de esparcimiento (EPR-PCS y MSS) y sus respectivos propagadores (EPR-P1 y EPR-P2) asociados a la generación de las zonas anteriores (A y B). Las pseudo fallas (MSS-PSF-E y MSS-PSF-I) y las depresiones Michoacán y Moctezuma relacionadas con los inicios de los centros de esparcimiento y sus propagadores. El sistema de la transformada RT {la transformada RT, la zona de fractura RFZ y la paleo transformada PRT} que divide estos dos tipos de anomalías y sus respectivos patrones textuales. Una gran depresión relacionada con la trinchera MAT que se puede subdividir en tres zonas, dos de ellas iguales pero no continuas con cobertura de sedimentos relativamente amplia sin presencia de estructuras que sobresalgan de dentro de su cobertura sedimentaria (D-1) y una zona con una cobertura de sedimentos estrecha, cortada por montes submarinos, escarpes y pequeñas cordilleras submarinas que sobresalen de la cobertura sedimentaria (D-2), en la que se encuentra el escarpe MSc, escarpe que aparentemente pasa desde la corteza oceánica hacia la corteza continental, que esta directamente relacionado con el conjunto de tres grandes anomalías magnéticas (área rallada 2D, en la Figura 50) con tendencia sub-horizontal entre la paleo transformada PRT y la trinchera MAT, que puede interpretarse como una zona de alta deformación entre las placas de RIV y COC. Unas zonas de alta deformación de corteza oceánica relacionadas con los OSS (G), que se encuentran entre dichos OSS o entre un propagador y la trinchera MAT, mostrando patrones textuales que denotan deformación tanto compresional como rotacional.

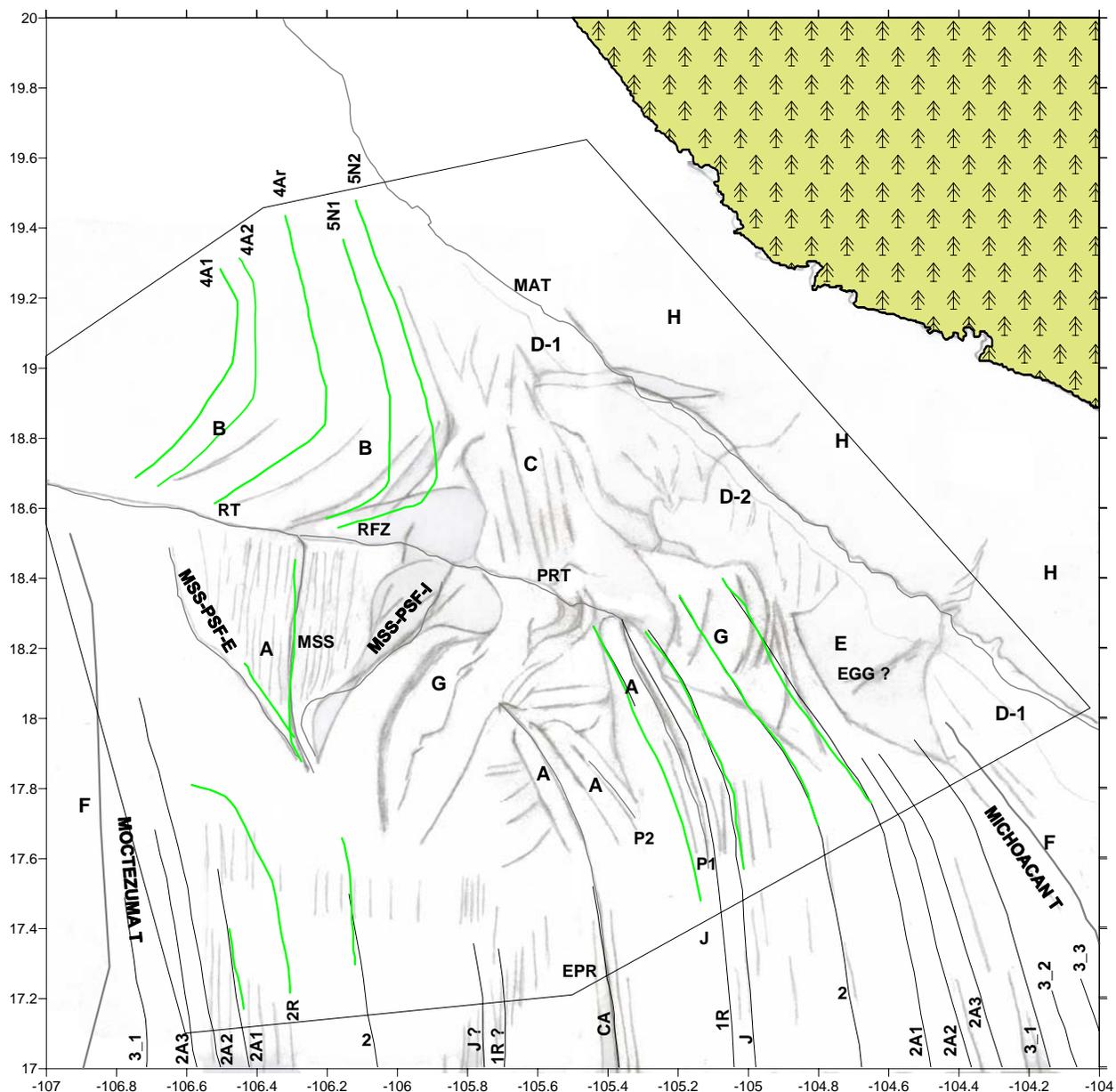


Figura 49. Esquema de la interpretación de los mapas de morfología y magnetometría, donde se muestran las principales estructuras morfotectónicas y su relación con las anomalías magnéticas perfectamente determinadas (identificadas con sus nombres). Ver Figuras 2, 44 y 45 para las abreviaciones.

Adicionalmente este estudio permitió a su vez identificar y proponer los siguientes elementos magnético-geológico-tectónicos (Figura 50): La zona de la corteza continental que está conformada por la plataforma y el talud continental (H), la cual se encuentra a la derecha de la trinchera MAT y que presenta diferencias morfológicas posiblemente relacionadas con la rugosidad de la corteza oceánica asociada. Una zona

de depresión relacionada con el graben EGG (E), la cual se encuentra dentro de la gran depresión de la trinchera MAT en su tramo más al sur y sobre sale un poco deformando lo que sería corteza oceánica reciente. Una zona que se identifica por una anomalía poco clara (línea roja en la Figura 50), pero con una firma magnética similar a la de un centro de esparcimiento normal como el segmento MSS, que al relacionarla con un patrón textural que no denota deformación (C), la interpretamos como un propagador que sobrepasó la posición de la paleo transformada PRT.

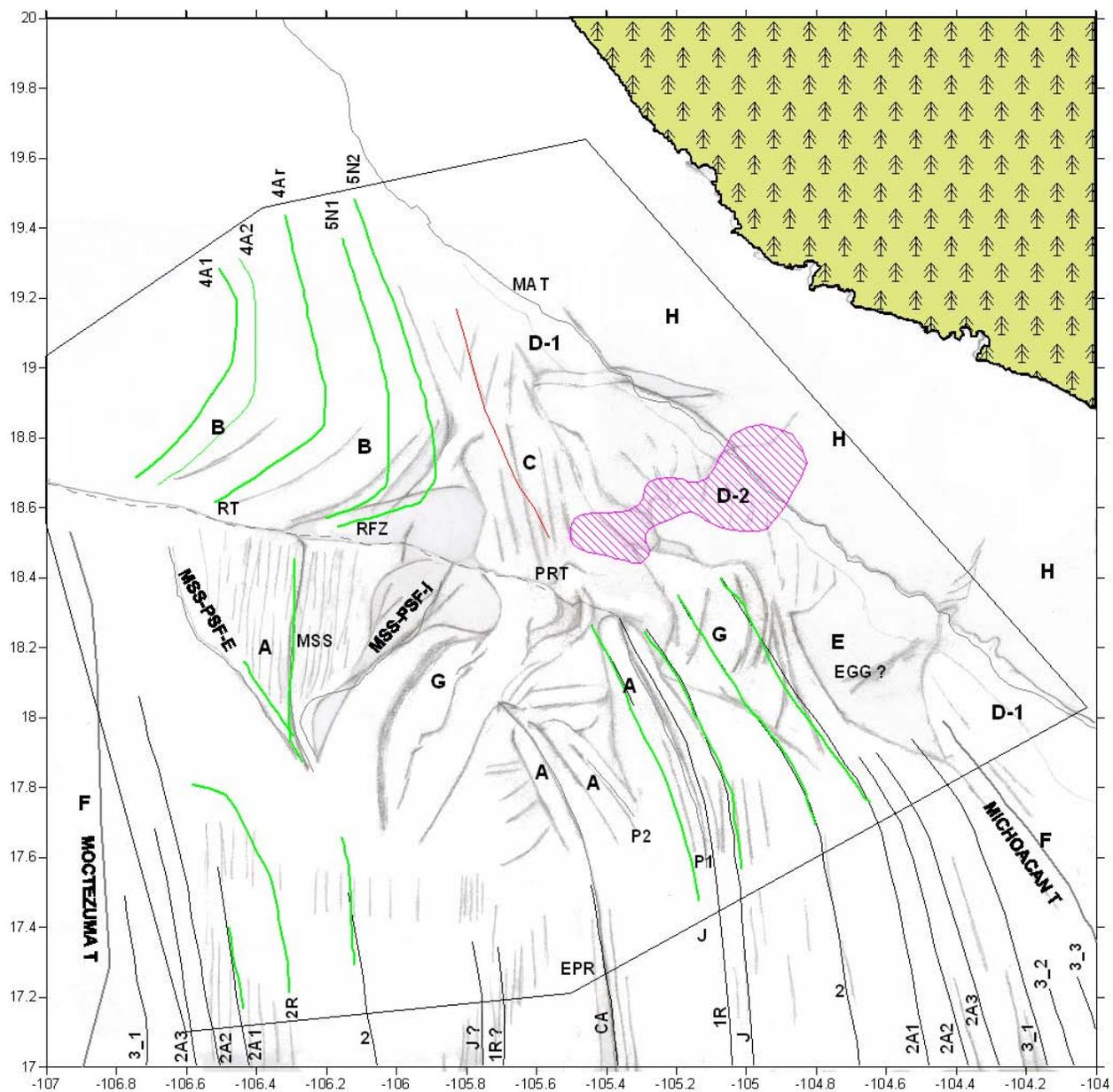


Figura 50. Esquematización de los diferentes tipos de zonas tectónicas presentes en la zona de estudio superpuesta a las principales estructuras morfotectónicas, las anomalías magnéticas perfectamente identificadas (identificadas con sus nombres) y los dos conjuntos de anomalías extrañas. Ver Figuras 2, 44 y 45 para las abreviaciones.

5. DISCUSIÓN

5.1. Evolución tectónica del límite sur de la Placa de Rivera

Identificadas y caracterizadas las principales estructuras tectónicas, las anomalías magnéticas y los diferentes tipos de zonas tectónicas que se ilustran en la Figura 50 y con el análisis de las hipótesis propuestas por otros autores en estudios anteriores, se plantea resolver varias discrepancias existentes respecto a la cronología de la propagación del segmento de la dorsal EPR-PCS y su relación tectónica con el sistema de la transformada RT y con la trinchera MAT, involucrando la evolución tectónica del límite entre las placas RIV y COC. Principalmente ¿Donde y cuando terminó la propagación del segmento de la dorsal EPR-PCS?

La evolución tectónica de la zona se inicia desde los 3 Ma, con fundamento en lo propuesto por *Mammerickx and Klitgord* [1982] y *Lonsdale* [1995]. Estas dos propuestas, indican que antes de los 3.5 Ma, el propagador del segmento de la dorsal MR se encontraba retrocediendo hacia el norte, lo que era compensado con la propagación hacia el norte del segmento de la dorsal EPR-PCS (Figura 51). Alrededor de los 3 Ma el segmento de la dorsal EPR-PCS alcanzó la Zona de Fractura de Clarión (“Clarion Fracture Zone” o CFZ), y el segmento de la dorsal MR no había retrocedido lo suficiente hacia la fractura CFZ. Periodo en el que ambas dorsales coexistían entre la Zona de Fractura de Orozco (“Orozco Fracture Zone” o OFZ) y la fractura CFZ.

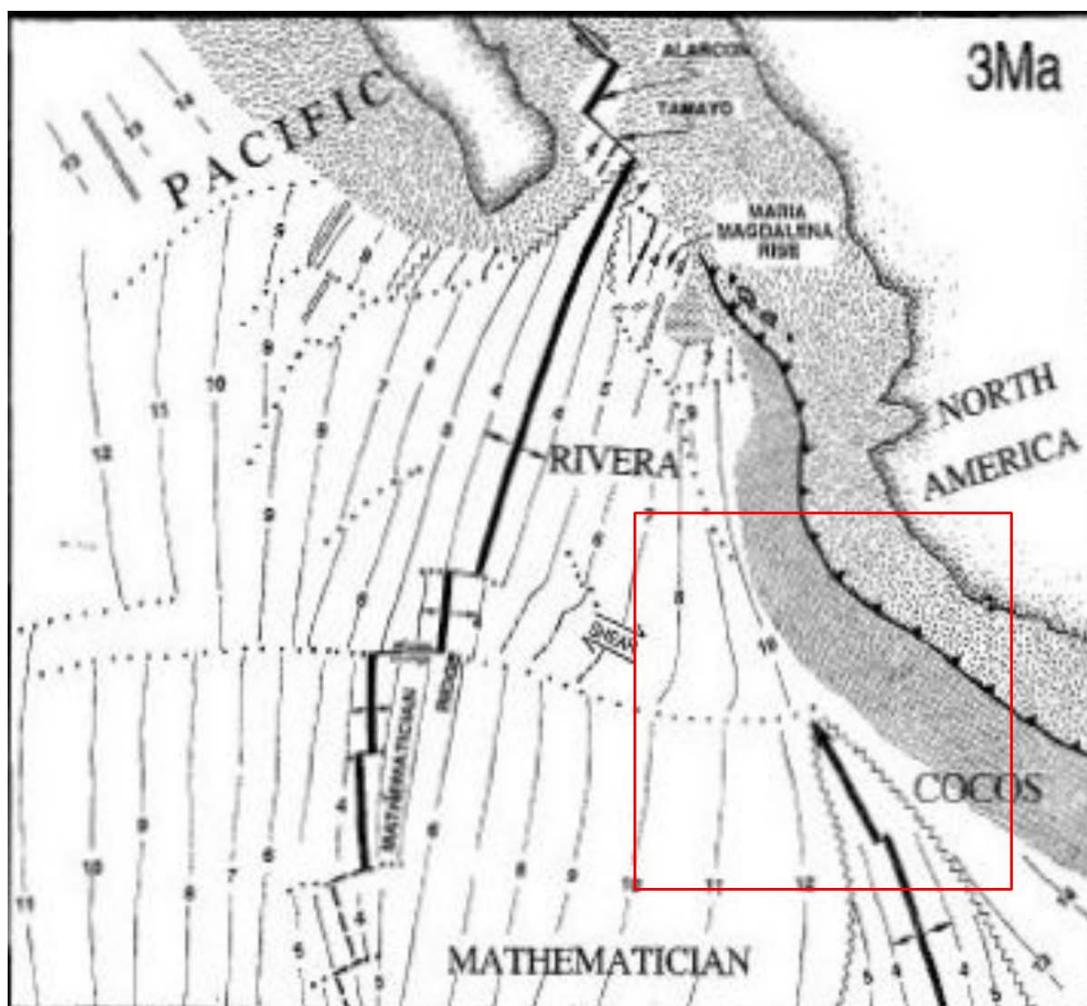


Figura 51. Diagrama tectónico de la zona de estudio de *Lonsdale* [1995] para los 3Ma. Área de estudio en recuadro rojo.

En el recuadro que aparece en la Figura 51 se muestra la zona específica (Figura 52) en la que se desarrolla la evolución tectónica propuesta en este estudio, comenzando a los 3 Ma. Este esquema integra la interpretación de *Lonsdale* [1995] y de los resultados de este estudio a partir de los nuevos datos. Comenzando con esta figura, la evolución tectónica se divide en 3 intervalos: (1) entre 3.0 Ma – 1.77 Ma, (2) entre 1.77 Ma – 1.5 Ma – 1.0 Ma y (3) entre 1Ma – 0.0 MA.

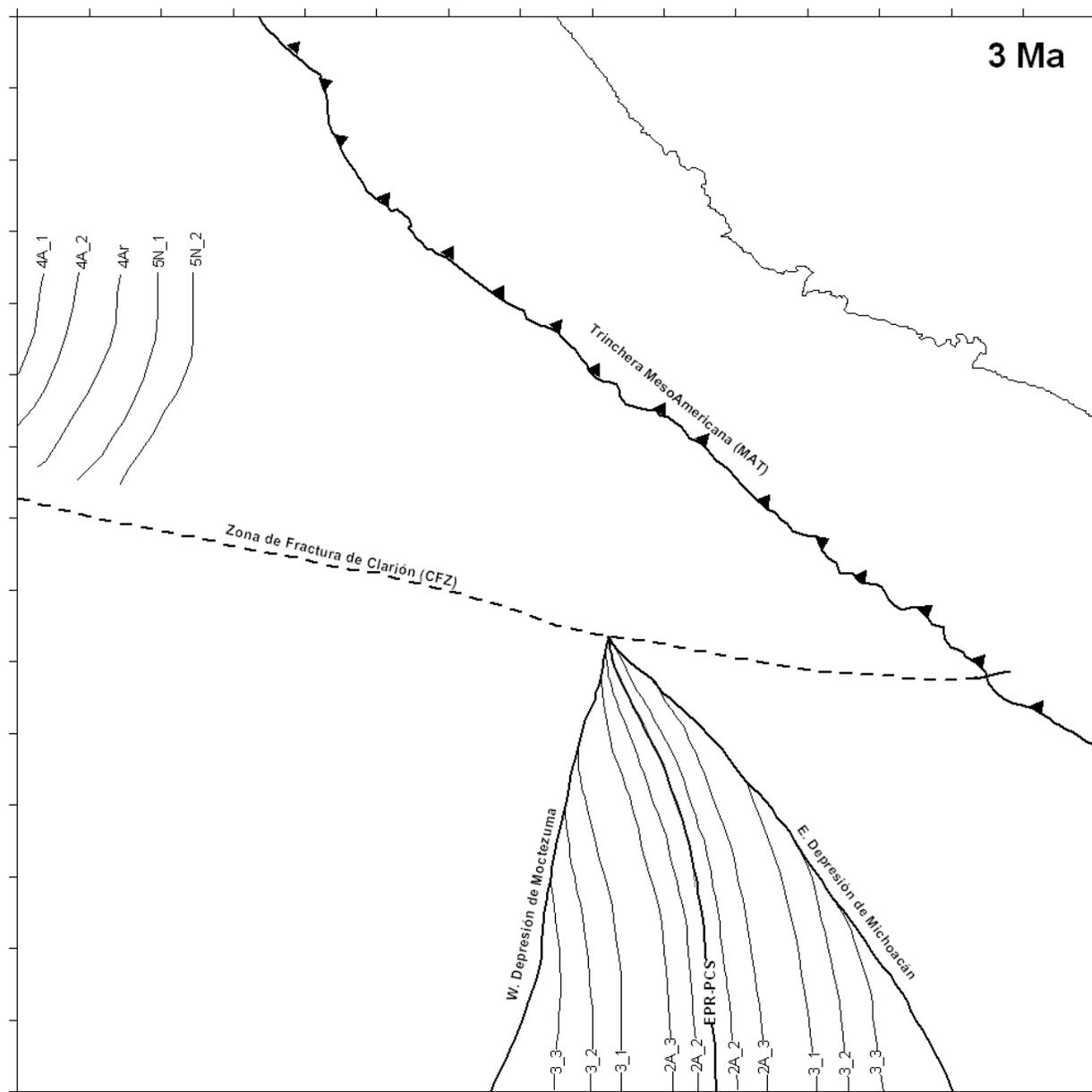


Figura 52. Esquema inicial de la evolución tectónica a los 3 Ma para la zona de estudio que integra la interpretación de *Lonsdale* [1995] y los resultados de este estudio.

5.2. Entre 3.0 Ma – 1.77 Ma

Los resultados indican que en este intervalo la dorsal MR continuó retrocediendo hasta la fractura CFZ, y entretanto el propagador de la dorsal EPR-PCS prosiguió avanzando hacia el norte superando la fractura CFZ (Figura 53) ubicándose en la posición

propuesta por *Bandy and Hilde* [2000] y *Michaud* [2001]. Específicamente entre ambos propagadores hay un área extensa que presentaba un movimiento relativo dextral, donde no se creó en este intervalo una transformada. Esta situación fue planteada inicialmente por *Lonsdale* [1995] y *DeMets and Traylen* [2000] pero sin tener en cuenta que el segmento de la dorsal EPR-PCS se localizaba al norte de la fractura CFZ.

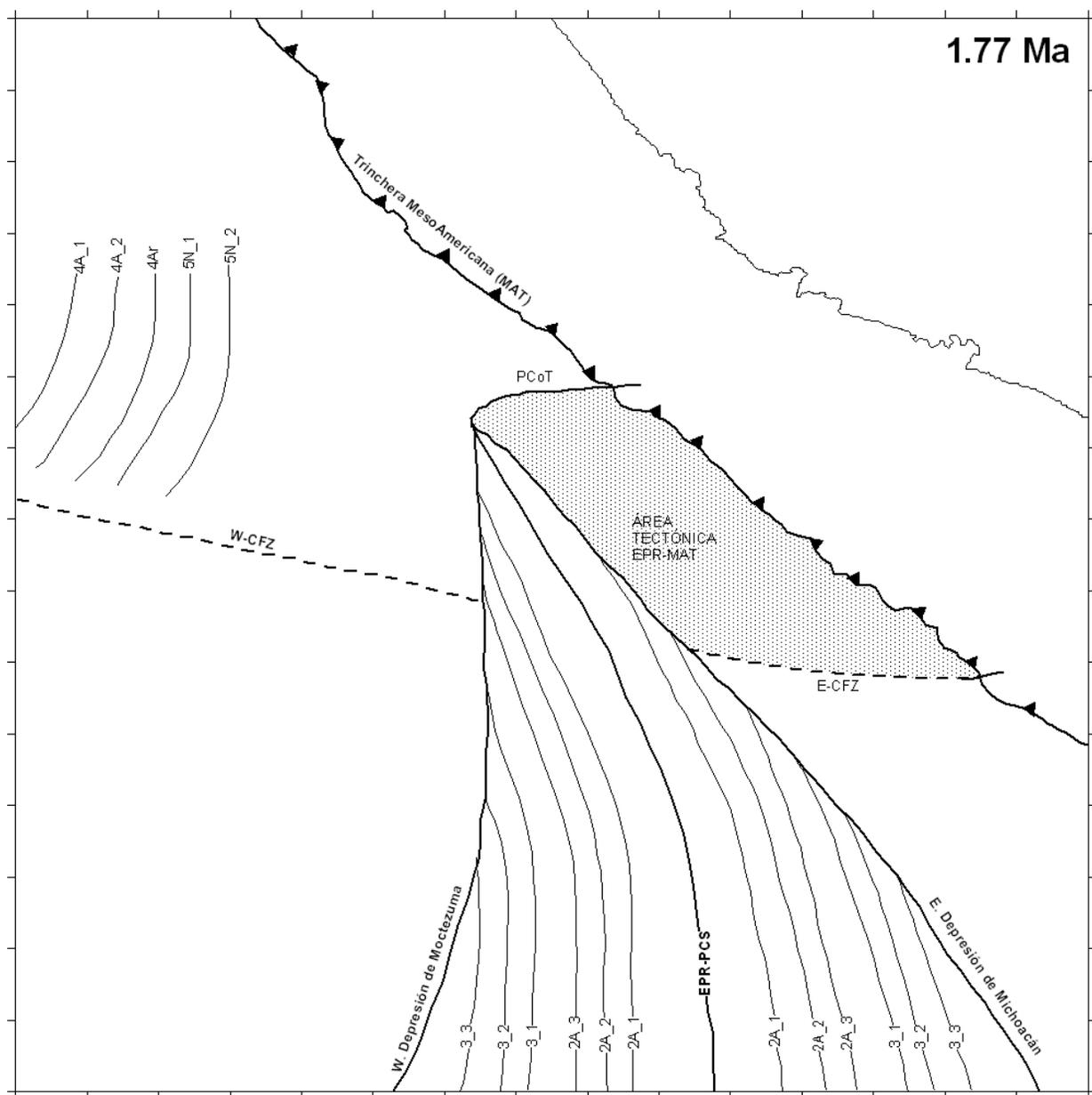


Figura 53. Esquema de la evolución tectónica para los 1.77 Ma.

Durante este mismo periodo, cuando el segmento de la dorsal EPR-PCS avanzó al norte de la fractura CFZ, la separó dejando una sección de esta, al lado oriental del propagador (Figura 53), que va desde la Depresión de Michoacán hasta la trinchera MAT y que en este estudio se define como la Sección Este de la Zona de Fractura de Clarión (E-CFZ). Esta sección E-CFZ es una estructura tectónicamente inactiva que separa cortezas de diferentes edades. *Madsen et al.* [1992] explica que este tipo de estructuras se separan cuando un propagador supera una zona de fractura cambiando sus características estructurales, como es el caso de la Zona de Fractura de O’Gorman (Figura 54), cuando el propagador de la dorsal EPR la sobrepasó, separándola de su lineamiento principal.

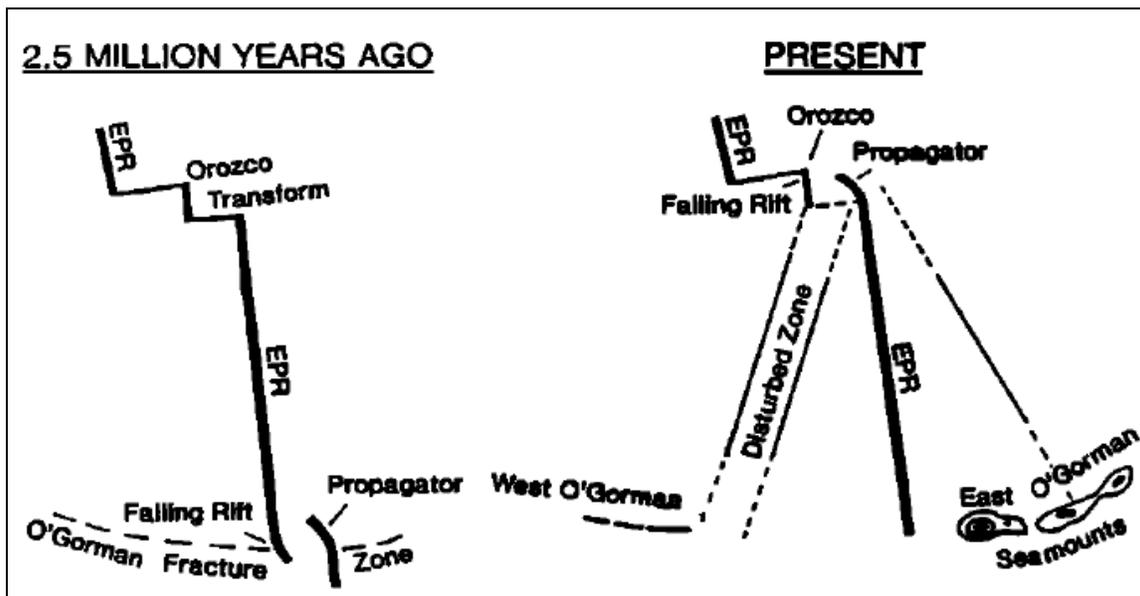


Figura 54. Diagramas de la evolución tectónica del propagador del EPR. El esquema muestra como la zona de fractura de O’Gorman es separada por el propagador desde los 2.5 Ma, modificada de *Madsen et al.* [1992].

Se propone también para este periodo, la formación de la estructura que se encuentra al oriente de la posición final del propagador del segmento de la dorsal EPR-PCS (Figura 53). La cual se puede explicar a partir de lo propuesto por *Michaud et al.* [2000, 2001] donde se indica que antes de que dicho propagador comenzara a retroceder, posiblemente se alcanzó a formar una transformada hacia el continente, que en este estudio se define como la Paleo-Transformada de Colima (PCoT). Esta transformada

dejó en el registro geológico el escarpe que se observa en el mapa morfológico, que parece atravesar la trinchera y se extiende hasta el pie del margen continental. Además, *Michaud et al.* [2001] agrega que el segmento de la dorsal EPR-PCS estaba demasiado cerca de la trinchera MAT y que posiblemente justo antes de los 2 Ma, una parte de esta dorsal pudo entrar a la zona de subducción. Lo que implicaría la existencia de un segmento subducido de la paleo-transformada PCoT que estaría afectando de manera significativa la tectónica del margen continental hasta los 1.77 Ma.

El área comprendida entre el segmento E-CFZ, el escarpe dejado por la paleo-transformada PCoT, la depresión de Michoacán y la trinchera MAT, se define como el Área Tectónica EPR-MAT (área sombreada en la Figura 53). En esta área como se observa en los mapas: morfológico (Figura 37) y magnetométrico (Figura 40) se identifican al menos dos patrones de lineamientos que representan una serie de estructuras pequeñas e intermedias de características complejas (Figura 50). Más específicamente en esta área EPR-MAT se observa que las estructuras en la parte sur pudieran estar relacionadas con la evolución del segmento E-CFZ, o con la formación del graben EGG o con una zona de esparcimiento oceánico. El escarpe MSc y los tres altos magnéticos localizados en la parte central de esta zona podrían estar relacionados con una deformación entre bloques corticales. Al norte se encuentra el escarpe que se relaciona con la paleo-transformada PCoT

El hecho de que el área EPR-MAT sea relativamente pequeña y se localice muy cerca a estructuras mayores como la trinchera MAT, el segmento del propagador de la dorsal EPR-PCS y la transformada RT, la hace susceptible a cambios en los regímenes de esfuerzos en las diferentes etapas de su evolución, que podrían implicar reorganización de las estructuras geológicas y acomodo de la corteza oceánica en esta área tectónica, resultando en una gran complejidad de las estructuras presentes. La falta de claridad en el patrón de las anomalías magnéticas, el complejo patrón en el relieve del piso oceánico y la alta complejidad estructural, no permitieron dilucidar la evolución de esta zona oceánica.

5.3. Entre 1.77 Ma – 1.5 Ma

Para este intervalo de tiempo se propone que la evolución del segmento de la dorsal EPR-PCS suspendió su propagación hacia el norte a los 1.77 Ma y comenzó a retroceder hacia la región donde se encontraba la zona de fractura CFZ (Figura 55) coincidiendo en este aspecto con la propuesta de *Bandy and Hilde* [2000]. Al mismo tiempo, el propagador del segmento de la dorsal MR retrocedió hasta la posición actual de la zona de fractura RFZ, propiciando la formación de la Transformada RT a los 1.5 Ma, etapa que coincide con lo propuesto por *Bandy and Hilde* [2000] e invalida las etapas propuestas por *Lonsdale* [1995] a los 3.5 Ma y por *DeMets and Traylen* [2000] a los 2.6 Ma.

La iniciación y evolución de la transformada RT aún no han sido explicadas con claridad. *Crane* [1976] plantea que hay una gran complejidad en la mecánica de desacoplamiento a lo largo de fallas transformantes indicando que es posible que durante un rápido cambio de la dirección relativa del movimiento entre las placas oceánicas, la reacomodación no se dé en las zonas de fractura preexistentes, si no que se propicie la formación de una nueva transformada, que intercepte oblicuamente a una zona de fractura preexistente. De manera similar a lo planteado por *Crane* [1976] se cree que la transformada RT se desarrolla alrededor de los 1.5 Ma, entre la antigua zona de fractura RFZ y la antigua zona de fractura CFZ [*Lonsdale*, 1995; *DeMets and Traylen*, 2000].

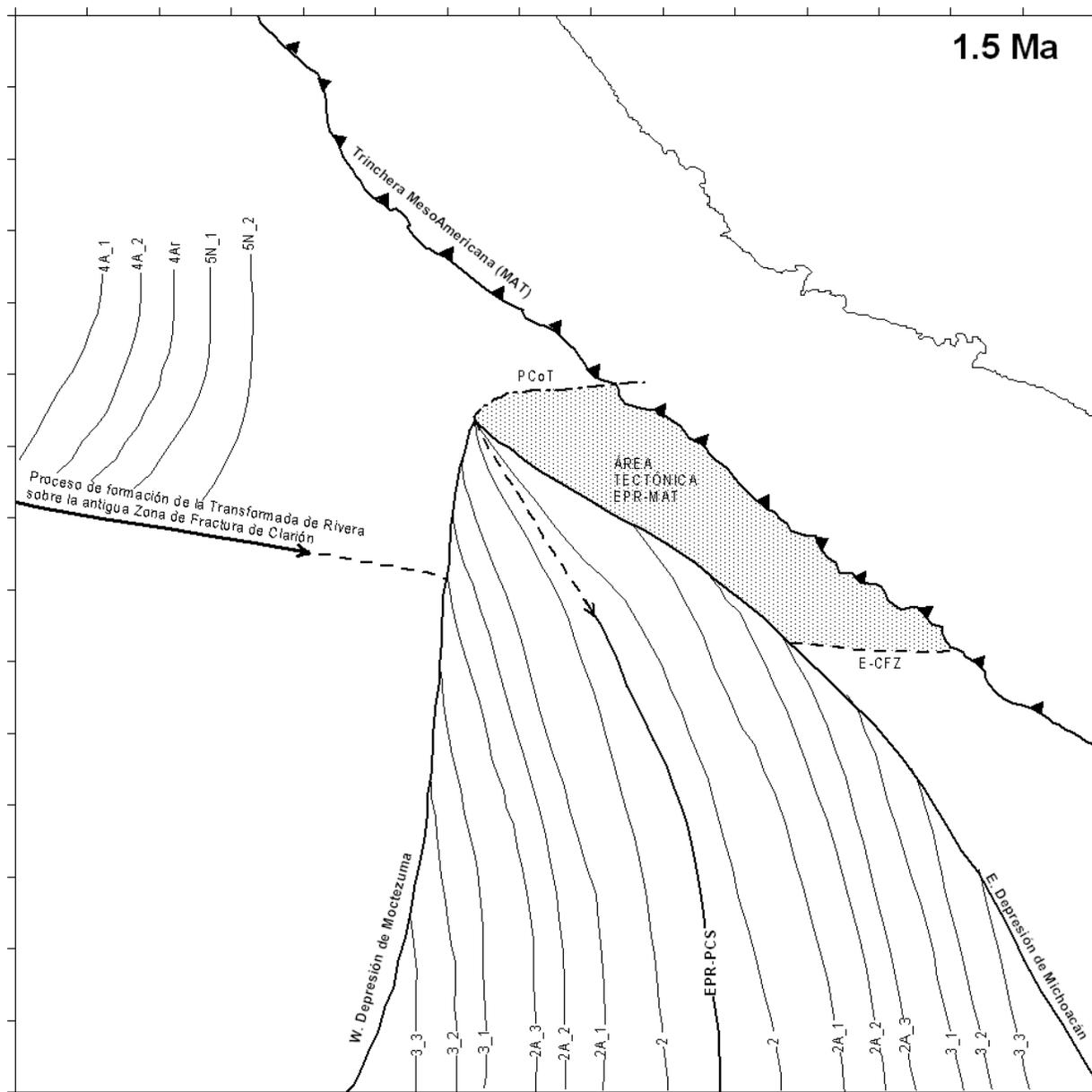


Figura 55. Esquema de la evolución tectónica para los 1.5 Ma.

5.4. Entre 1.5 Ma – 0.0 Ma

En este periodo de tiempo se observan muchas características de la evolución tectónica. A 1.0 Ma la transformada RT ya había alcanzado el segmento EPR-PCS, permitiendo el desplazamiento dextral relativo de los dos bloques corticales, separados por la transformada RT. Es importante señalar que al concluir el proceso de formación

de la transformada RT (Figura 56), está alcanza su máxima longitud (~450 km), ubicándola dentro de la clasificación de las transformadas mayores, dado que su gran longitud les imprime características especiales.

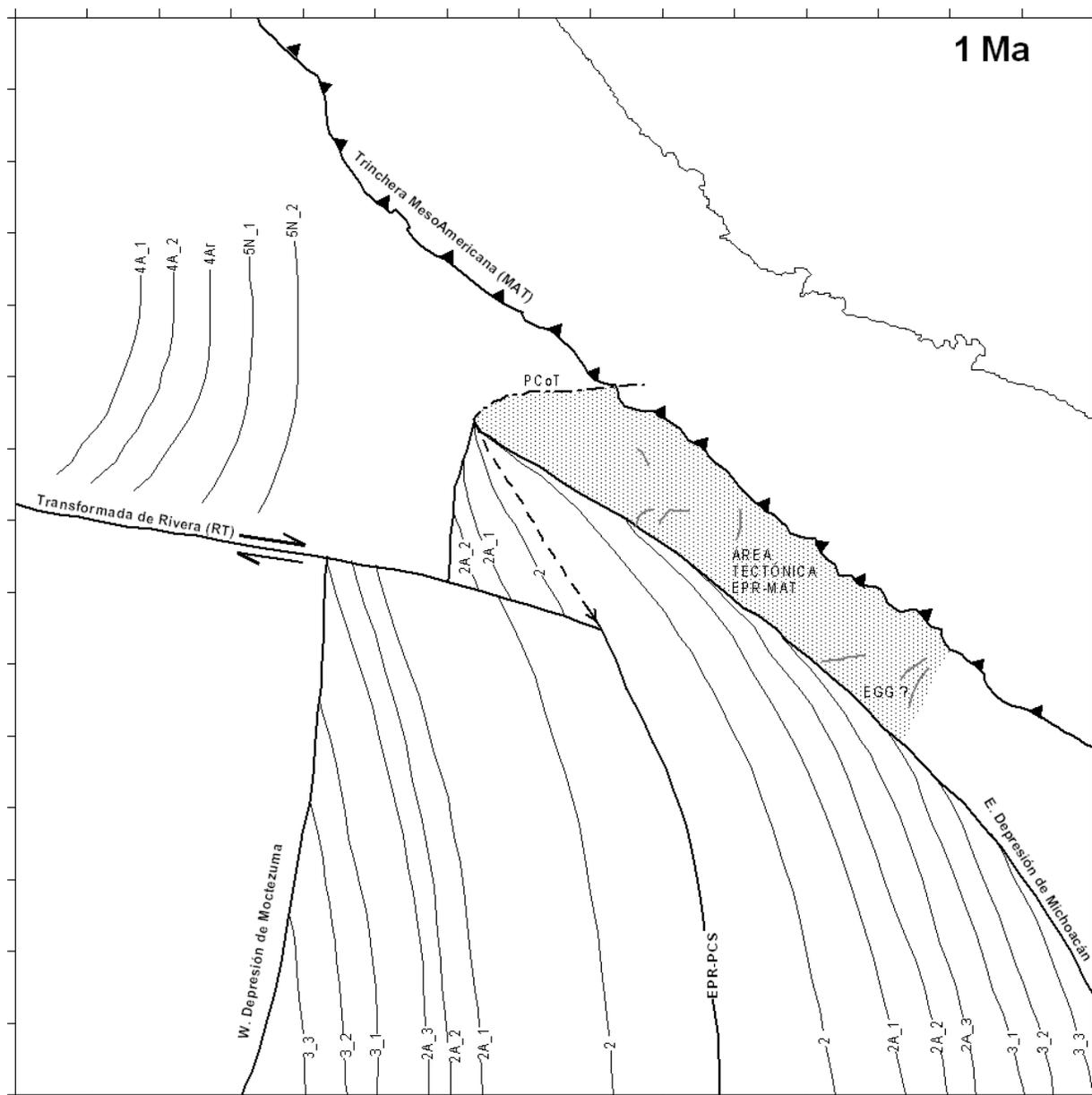


Figura 56. Esquema de la evolución tectónica para 1 Ma.

En este periodo de tiempo se observan estructuras intermedias o menores entre las estructuras mayores activas (e.g., propagadores y transformadas) que han sido

deformadas. Lo anterior se puede explicar de forma general a partir de lo planteado por *Madsen et al.* [1992] quien indica que la presencia de zonas deformadas que no presentan la textura típica del esparcimiento oceánico, implicaría que han ocurrido reorganizaciones tectónicas mayores o cambios en el proceso del propagador. Esto se observa: (1) en las zonas de traslape entre los centros de esparcimiento OSS, (2) en las regiones por donde se propaga el segmento de la dorsal EPR-PCS y (3) en el área tectónica EPR-MAT.

En este periodo, considerando la información dada por las anomalías magnéticas, se propone que hay una reorganización mayor alrededor de los 0.8 Ma, después del desarrollo de la anomalía magnética J. El segmento de la dorsal EPR-PCS continuaba retrocediendo hacia el sur (Figura 57), hasta que se suspende el esparcimiento, abandonándose el propagador (EPR-P1) y propiciando la formación de un nuevo propagador EPR-P2 con la misma curvatura, en el lado interno del propagador EPR-P1. El propagador EPR-P2 avanza hacia el norte durante un corto periodo de tiempo. Luego se repite el ciclo anterior a los 0.4 Ma, generando un nuevo propagador EPR-PCS que avanza hacia el norte, que es el que se encuentra activo actualmente separando las placas PAC y COC.

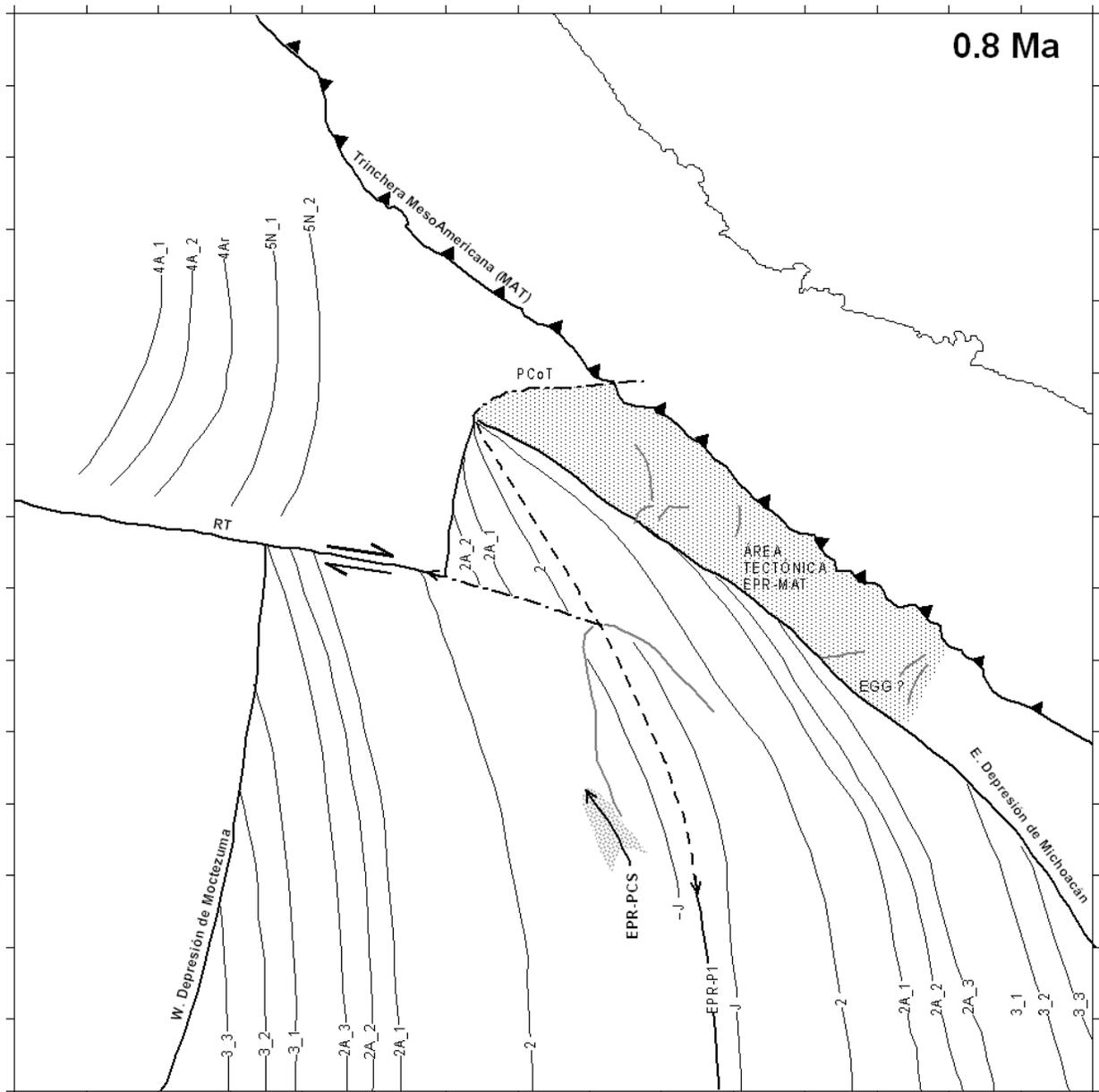


Figura 57. Esquema de la evolución tectónica para los 0.8 Ma.

Lo propuesto en el párrafo anterior está soportado teóricamente por *Wilson* [1990] con el modelo de traslape de centros de esparcimiento con abandono cíclico de propagadores (“Overlapping Rift Propagation with Cyclic Rift failure”). Según este modelo, el comportamiento de los propagadores se caracteriza por ser un proceso cíclico, en el cual los propagadores se van abandonando, propiciando la formación de un nuevo propagador, que retorna repetidamente en un salto discreto conservando su geometría curvada inicial, confirmando y refinando el modelo de *McKenzie* [1986] tal

como se muestra en la Figura 58. Modelo que a su vez está basado en la teoría de los propagadores propuesta por *Hey* [1977] quien introdujo a la teoría de la tectónica de placas el concepto de las zonas de traslape de centros de esparcimiento OSS. Las causas de porqué este ciclo en que el propagador cesa, se abandona, salta discretamente a otra posición y forma una nueva zona de acomodamiento, son aún motivo de estudio.

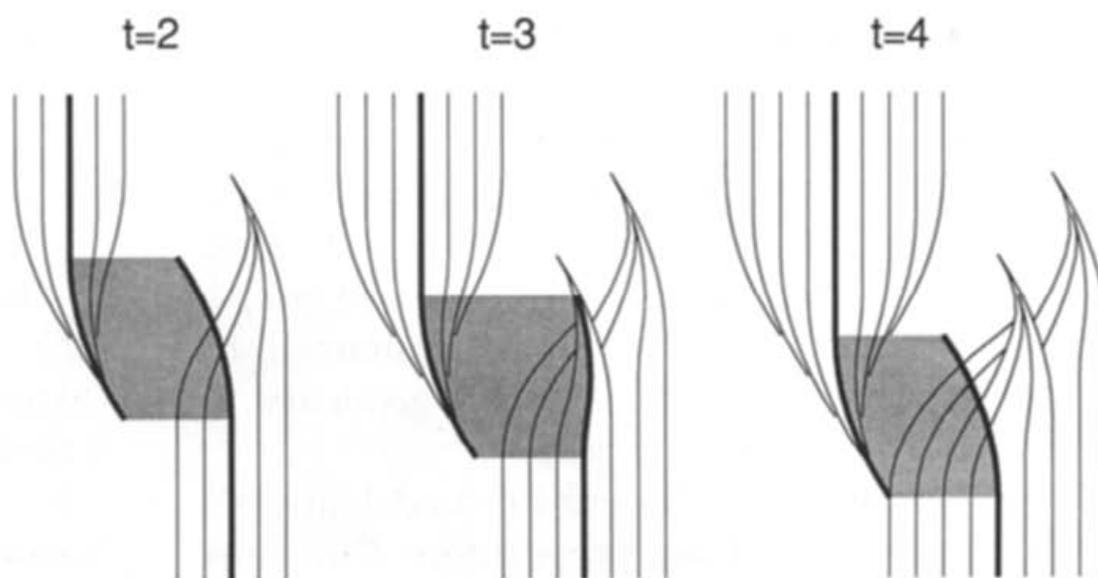


Figura 58. Diagramas evolutivos del modelo de *Wilson* [1990] de traslape de centros de esparcimiento con abandono cíclico de propagadores (“Overlapping Rift Propagation with Cyclic Rift failure”).

En un momento entre los 0.8 Ma y los 0.4 Ma, se comenzó a formar hacia el sur el propagador MSS desde la transformada RT desactivando un tramo de esta, localizado al oriente del propagador MSS. Este propagador MSS va formando las pseudo fallas interna y externa, que se muestran en las Figuras 59 y 60. Simultáneamente el segmento EPR-PCS se está propagando hacia el norte y se forma la zona de traslape OSS entre estos dos propagadores alrededor de los 0.4 Ma. Esta zona de traslape muestra una alta deformación debido a los esfuerzos de cizalla generados entre ambos propagadores y por el abandono cíclico de uno de ellos, concordando con lo propuesto por *Wilson* [1990].

En este periodo de tiempo se observa que desde el primer salto del segmento de la dorsal EPR-PCS, la distancia entre las anomalías 2, al eje del centro de esparcimiento no es simétrica, siendo mayor en el flanco occidental, distancia que se incrementa con cada salto. Esta asimetría y el respectivo incremento en la distancia entre las anomalías magnéticas probablemente están relacionados con cada uno de los nuevos propagadores y sus saltos discretos hacia el occidente. *Madsen et al.* [1992] sugiere que, cuando se presentan diferencias significativas en la distancia entre anomalías magnéticas a ambos lados de un centro de esparcimiento, el sector de mayor extensión es producto de transferencia de corteza oceánica o que se generó en el nueva corteza oceánica. *Madsen et al.* [1992] también señala que el sector de mayor extensión está limitado entre estructuras inactivas y una zona deformada, situación que se observa claramente en nuestro caso de estudio (Figura 59 y 60) en la zona OSS que se encuentra entre el propagador MSS y la zona donde se desarrolló el proceso de abandono cíclico de los propagadores del segmento de la dorsal EPR-PCS.

Alternativamente puede explicarse que la asimetría entre las anomalías magnéticas se deba a que al momento de la formación de la transformada RT (1.5 Ma) se presenten movimientos diferenciales que permitirían que el sector occidental del segmento del propagador EPR-PCS se desplazara a una mayor velocidad respecto a su contra parte en el flanco oriental. Otra explicación es que el segmento EPR-PCS tenga a partir de los 1.77 Ma una tasa de esparcimiento asimétrica con una mayor velocidad de esparcimiento en su flanco occidental.

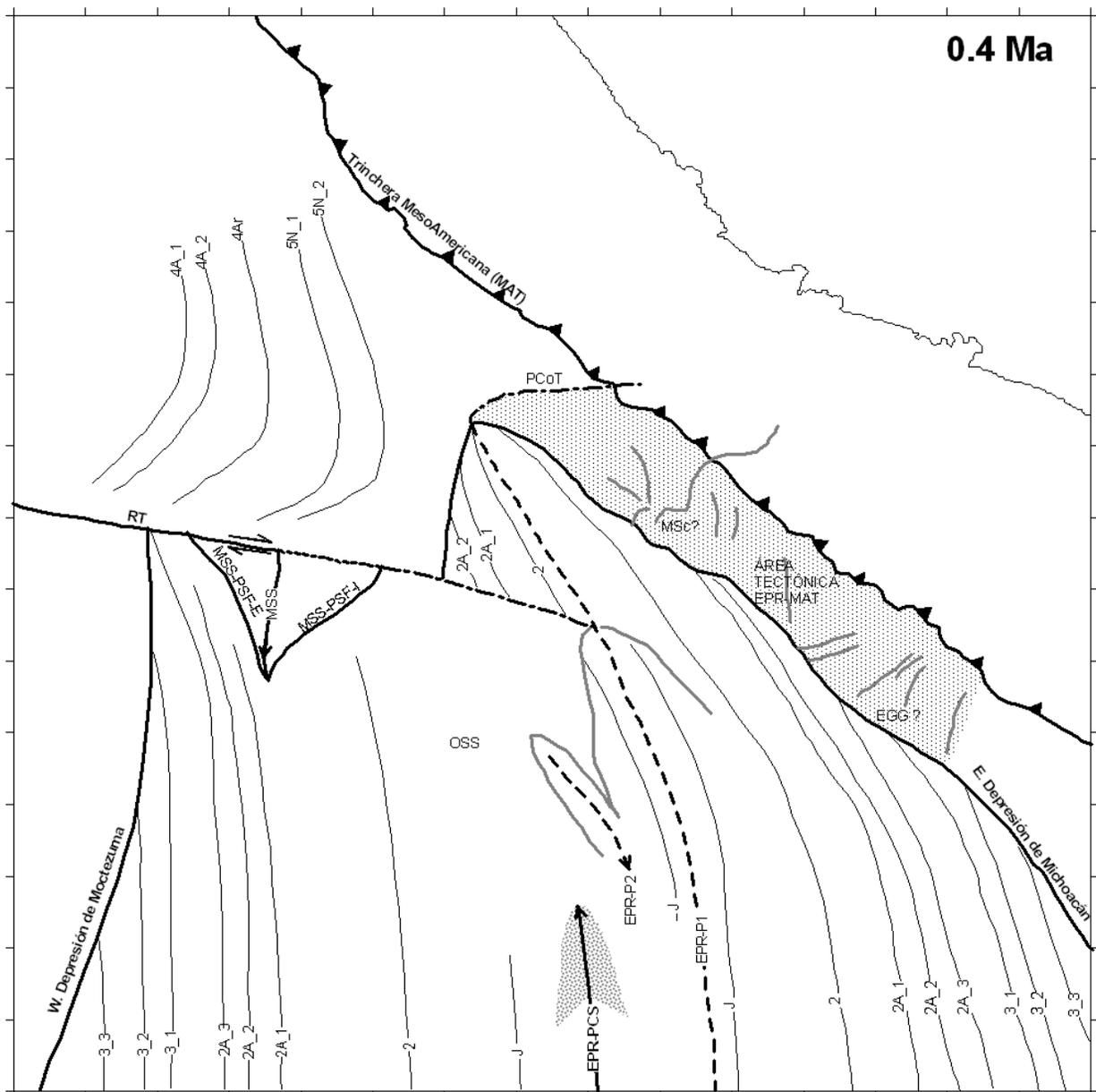


Figura 59. Esquema de la evolución tectónica para los 0.4 Ma.

La Figura 60 muestra el estado actual de la tectónica de la zona de estudio, donde se observa que los propagadores MSS y EPR-PCS avanzaron simultáneamente en direcciones opuestas hasta alcanzar su posición actual, acentuando la deformación en la zona de traslape OSS. También se observa una mayor deformación en las estructuras intermedias y menores en las zonas por donde se propagó el segmento de

la dorsal EPR-PCS y en el área tectónica EPR-MAT. En esta última, la depresión de Michoacán se confunde con la trinchera MAT y el graben EGG.

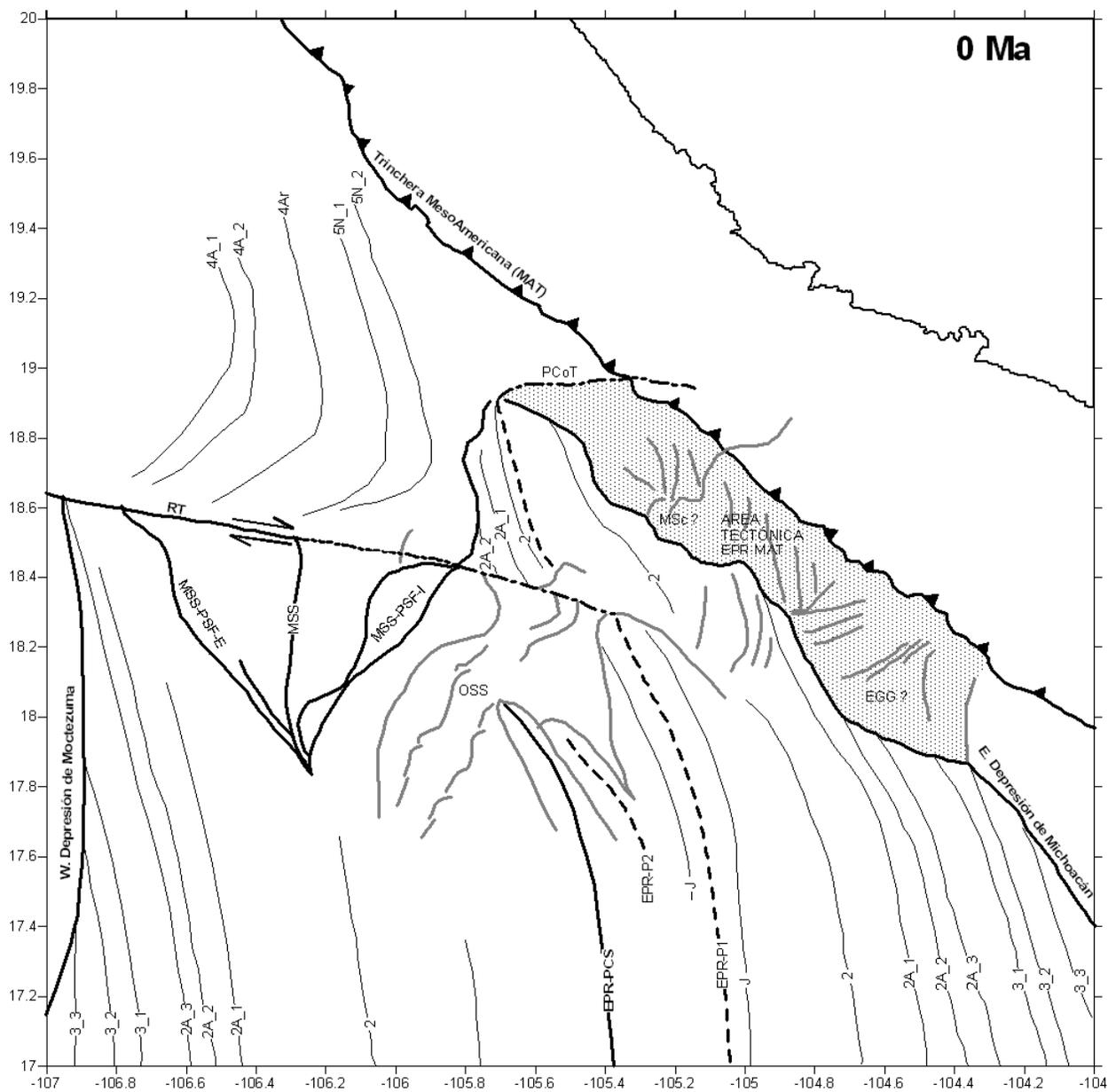


Figura 60. Esquema de la evolución tectónica para los 0 Ma.

6. CONCLUSIONES

El límite entre las placas de Rivera y Cocos está influenciado por la evolución y cercanía al segmento de esparcimiento “East Pacific Rise, Pacific-Cocos Segment” (EPR-PCS), la trinchera MAT y la transformada RT. En la zona de intersección no se percibe un límite claramente definido, pero sí se observan una serie de estructuras intermedias y una dispersión de sismos con mecanismos focales laterales, lo que indica que este límite está dominado por esfuerzos transcurrentes.

Una nueva revisión de las anomalías magnéticas muestra que el segmento de esparcimiento EPR-PCS alcanzó su punto más al norte $\sim 18.9^\circ\text{N}$, pasando la posición actual de la transformada RT, ~ 1.7 Ma. Luego el esparcimiento comenzó a retroceder hacia el sur, alcanzando la posición actual de la paleo transformada PRT a los 1.5 Ma. La formación de la Transformada RT se dio alrededor de los 1.5 Ma, entre las antiguas zonas de fractura RFZ y CFZ, debido a una reorganización tectónica mayor. También se determinó que la estructura ubicada en el punto más al norte alcanzado por el segmento de esparcimiento EPR-PCS, es un escarpe desarrollado posiblemente por una falla transformante que se nombró como la Paleo-Transformada de Colima (PCoT). Además se identificó un escarpe que puede ser el resultado de una posible deformación entre bloques corticales, que se nombró Escarpe de Manzanillo (MSc), y que aparentemente continúa desde la corteza oceánica hacia el margen continental, mostrando un patrón sinusoidal o de forma en echelon y coincidiendo espacialmente con un conjunto de tres anomalías magnéticas alineadas en el mismo sentido.

Estas nuevas recopilaciones de datos muestran que el modelo de traslape de centros de esparcimiento con abandono cíclico de propagadores “Overlapping Rift Propagation with Cyclic Rift Failure”, planteado por *Wilson* [1990] es perfectamente aplicable a la evolución de los propagadores del segmento de esparcimiento EPR-PCS. La asimetría que se observa entre ciertas anomalías magnéticas, está relacionada con cada uno de los nuevos propagadores, al saltar discretamente hacia el occidente, propiciando que este sector termine siendo más amplio con cada salto en la misma dirección.

REFERENCIAS

- Atwater, T. (1989), Plate tectonic history of the northeast Pacific and western North America, in *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii: Geology of North America*, Vol. N, Edited by E. L. Winterer, D. M. Hussong, and R. W. Decker, pp. 21-72, GSA, Boulder, Colorado, USA.
- Atwater, T., and J. Stock (1998), Pacific-North America plate tectonics of the Neogene southwestern United States: an update, *International Geology Review*, 40(5), 375-402.
- Batiza, R., and J. White (2000), Submarine lavas and hyaloclastites, in *Encyclopedia of Volcanoes*, edited by H. Sigurdsson, pp. 361-38, Academic Press,
- Bandy, W. L. (1992), Geological and geophysical investigation of the Rivera-Cocos plate boundary: Implications for plate fragmentation, Ph.D. dissertation, 195 pp., Tex. A&M Univ., College station, August.
- Bandy, W., and M. Pardo (1994), Statistical examination of the existence and relative motion of the Jalisco and Southern Mexico Blocks, *Tectonics*, 13(4), 755–768.
- Bandy, W. L., C. Mortera-Gutierrez, J. Urrutia/Fucugauchi, and T. W. C. Hilde (1995), The subducted Rivera-Cocos plate boundary: Where is it, what is it, and what is its relationship to the Colima rift?, *Geophysical Research Letters*, 22, 3075-3078.
- Bandy, W. L., V. Kostoglodov, and C. A. Mortera-Gutiérrez (1998), Southwest Migration of the Instantaneous Rivera-Pacific Euler Pole Since 0.78 Ma, *Geofísica Internacional*, 37, 153-169.
- Bandy, W. L., and T. W. C. Hilde (2000), Morphology and recent history of the ridge propagator system located at 18°N, 106°W, in *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico*, edited by H. Delgado-Granados, G. Aguirre Diaz, and J. M. Stock, *Geol. Soc. Am., Spec. Pap. 334*, pp 29-40, Boulder, Colorado.
- Bandy, W. L., T. W. C. Hilde, and C. Y. Yan (2000), The Rivera-Cocos plate boundary: Implications for Rivera-Cocos relative motion and plate fragmentation, in *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico*, edited by H. Delgado-Granados, G. Aguirre Diaz, and J. M. Stock, *Geol. Soc. Am., Spec. Pap. 334*, pp 1-28, Boulder, Colorado.
- Bandy, W. L., F. Michaud, J. Bourgois, T. Calmus, J. Dymant, C. A. Mortera-Gutierrez, J. Ortega-Ramirez, B. Pontoise, J.Y. Royer, B. Sichler, M. Sosson, M. Rebolledo-Vieyra, F. Bigot-Cormier, O. Diaz-Molina, A. D. Hurtado-Artunduaga, G. Pardo-Castro and C. Trouillard-Perrot (2005), Subsidence and strike-slip tectonism of the upper continental slope off Manzanillo, Mexico, *Tectonophysics*, 398(3-4), 115-140.

- Bird, P. (2003) An updated digital model of plate boundaries, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
- Bourgois, J., V. Renard, J. Aubouin, W. Bandy, E. Barrier, T. Calmus, J.-C. Carfantan, J. Guerrero, J. Mammerickx, B. Mercier de Lepinay, F. Michaud, and M. Sosson (1988), Active fragmentation of the North American plate: offshore boundary of the Jalisco block off Manzanillo, *C.R. Acad. Sci. Paris, Serie 2*, 307, 1121-1130.
- Bourgois J., and F. Michaud (1991), Active fragmentation of the North America plate at the Mexican triple junction area off Manzanillo, *Geo-Marine Letters*, 11 (2), 59-65.
- Bourgois J., H. Martin, Y. Lagabrielle, J. Le-Moigne, and J. Frutos-Jara (1996), Subduction erosion related to spreading-ridge subduction: Taitao peninsula (Chile margin triple junction area). *Geology*, 24(8), 723–726.
- Bourgois J., and F. Michaud (2002), Comparison between the Chile and Mexico triple junction areas substantiates slab window development beneath northwestern Mexico during the past 12-10 Myr. *Earth and Planetary Science Letters*, 201(1), 35-44.
- Breiner, S. (1973), *Applications manual for portable magnetometers*, pp 58., Geometrics, San Jose, California, USA.
- Bohannon, R.G., and T. Parsons (1995) Tectonic implications of post-30 Ma Pacific and North American relative plate motions, *Geological Society of America Bulletin*, Volume 107, Issue 8, Pages 937-959.
- Buchanan, S. K., R. A. Scrutton, R. A. Edwards, and R. B. Whitmarsh (1996), Marine Magnetic Data Processing In Equatorial Regions Off Ghana, *Geophysical Journal International* 125 (1), 123–131.
- Bullard E. C., and R. G. Mason (1961), The magnetic field astern of a ship, *Deep Sea Research*, 8(1), 20-27.
- Calmus, T, G. Poupeau, J. Bourgois, F. Michaud, B. Mercier de Lepinay, E. Labrin, A. Azdimousa (1999), Late Mesozoic and Cenozoic thermotectonic history of the Mexican Pacific margin (18 to 25°N): new insight from apatite and zircon fission-track analysis of coastal and offshore plutonic rocks, *Tectonophysics*, 06(2), 163-182.
- Cande, S. C., and D. V. Kent (1995), Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic, *J. Geophys. Res.*, 100(B4), 6093–6095.
- Clift, P., and P. Vannucchi (2004), Controls on tectonic accretion versus erosion in subduction zones: Implications for the origin and recycling of the continental crust, *Rev. Geophys.*, 42.
- Cloos, M. (1993), Lithospheric buoyancy and collisional orogenesis: Subduction of oceanic plateaus, continental margins, island arcs, spreading ridges, and seamounts. *GSA Bulletin*, 105(6), 715–737.

- Coney, P.J. (1989), Structural aspects of suspect terranes and accretionary tectonics in western North America, *Journal of Structural Geology*, 11(1-2), 107-125.
- Crane, K. (1976), The intersection of the Siqueiros Transform Fault and the East Pacific Rise, *Marine Geology*, 21(1), 25-46.
- DeMets, C., R. G. Gordon, S. Stein, and D. F. Argus (1987), A Revised Estimate of Pacific-North America Motion and Implications for Western North America Plate Boundary Zone Tectonics, *Geophys. Res. Lett.*, 14(9), 911-914.
- DeMets, C., and S. Stein (1990), Present-day Kinematics of the Rivera Plate and Implications for Tectonics in Southwestern Mexico, *J. Geophys. Res.*, 95(B13), 21931-21948.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein (1994), Effect of Recent Revisions to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motions, *Geophys. Res. Lett.*, 21(20), 2191-2194.
- DeMets, C., and D. S. Wilson (1997), Relative motions of the Pacific, Rivera, North American, and Cocos plates since 0.78 Ma, *J. Geophys. Res.*, 102(B2), 2789-2806.
- DeMets C., and S. Traylen (2000), Motion of the Rivera plate since 10 Ma relative to the Pacific and North American plates and the mantle, *Tectonophysics*, 318, 119-159.
- Eggers, D.E., and D.T. Thompson (1984). An evaluation of the marine magnetic gradiometer. *Geophysics*, 49(6), 771-779.
- Eissler, H. K., and K. C. McNally (1984), Seismicity and Tectonics of the Rivera Plate and Implications for the 1932 Jalisco, Mexico, Earthquake, *J. Geophys. Res.*, 89(B6), 4520-4530.
- Embley, R.W., and D.S. Wilson (1992), Morphology of the Blanco Transform Fault Zone-NE Pacific: Implications for its tectonic evolution, *Marine Geophysical Researches*, 14 (1), 25-45.
- Ferrari, L. (2004), Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico. *Geology*, 32(1), 77-80.
- Geometrics, Inc. (Eds.) (2001), *G-877 Marine Magnetometer 25165-OM Rev. A Operation Manual*, pp 44., Geometrics, Inc., San Jose, CA, USA.
- Goff, J.A., D.J. Fornari, J.R. Cochran, C. Keeley, and A.Malinverno (1993), Wilkes transform system and "nannoplate", *Geology*, 21(7), 623-626.
- Gorbatov, A., and Y. Fukao (2005), Tomographic search for missing link between the ancient Farallon subduction and the present Cocos subduction, *Geophysical Journal International* 160(3), 849-854.

- Gutscher, M.A., J. Malavieille, S. Lallemand and J.Y. Collot (1999), Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision, *Earth and Planetary Science Letters*, 168(3-4), 255-270.
- Hey, R. (1977), A new class of "pseudofaults" and their bearing on plate tectonics: A propagating rift model, *Earth and Planetary Science Letters*, 37(2), 321-325.
- Johnston, S. T., and D. J. Thorkelson (1997), Cocos-Nazca slab window beneath Central America, *Earth and Planetary Science Letters*, 146(3-4), 465-474.
- Kearey, P., and F. J. Vine (1996), *Global tectonics*, 2nd ed., 320 pp., Blackwell Science, Oxford.
- Kleinrock, M. C., and R. N. Hey (1989), Migrating Transform Zone and Lithospheric Transfer at the Galapagos 95.5°W Propagator, *J. Geophys. Res.*, 94(B10), 13859–13878.
- Kleinrock, M. C., R. C. Searle, and R. N. Hey (1989), Tectonics of the Failing Spreading System Associated With the 95.5°W Galapagos Propagator, *J. Geophys. Res.*, 94(B10), 13839–13857.
- Klitgord, K. D., and J. Mammerickx (1982), Northern East Pacific Rise: Magnetic Anomaly and Bathymetric Framework, *J. Geophys. Res.*, 87(B8), 6725–6750.
- Kostoglodov, V., and W. L. Bandy (1995), Seismotectonic constraints on the convergence rate between the Rivera and North American plates, *J. Geophys. Res.*, 100, 17977-17989.
- Lonsdale P. (1991), Structural pattern of the pacific floor offshore peninsular California. *AAPG Memoir*, 47, 87-125.
- Lonsdale, P. (1995), Segmentation and Disruption of the East Pacific Rise in the mouth of the Gulf of California, *Marine Geophysical Researches*, 17, 323-359.
- Madsen, J. A., D. J. Fornari, M. H. Edwards, D. G. Gallo, and M. R. Perfit (1992), Kinematic framework of the cocos-pacific plate boundary from 13°n to the orozco transform fault: results from an extensive magnetic and seamarc ii survey, *J. Geophys. Res.*, 97(B5), 7011–7024.
- Mammerickx, J., and K. D. Klitgord (1982), Northern East Pacific Rise: Evolution From 25 m.y. B.P. to the Present, *J. Geophys. Res.*, 87(B8), 6751–6759.
- Mammerickx, J., D. F. Naar, and R. L. Tyce (1988), The Mathematician Paleoplate, *J. Geophys. Res.*, 93(B4), 3025–3040.
- Mammerickx, J. and I. S. E. Carmichael (1989), A spreading incursion in the continent near the Rivera plate and Jalisco Block? (abstract), *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, 70, 1318-1319.

- Manea, M., V. C. Manea, L. Ferrari, V. Kostoglodov and W. L. Bandy (2005), Tectonic evolution of the Tehuantepec Ridge, *Earth and Planetary Science Letters*, 238(1-2), 64-77.
- McKenzie, D. (1986), The geometry of propagating rifts, *Earth and Planetary Science Letters*, 77(2), 176-186.
- Michaud. F., J. Y. Royer, J. Bourgois, B. Mercier de Lepinay and G. Petit Liaudon (1997), the Rivera fracture zone revisited. *Marine Geology*, 137, 207-225.
- Michaud. F., J. Dañoibeitia, R. Carbonell, R. Bartolomé, D. Cordoba, L. DelgadoF. Nuñez-Cornu and T. Monfret (2000), New insights into the subducting ocean crust in the Middle American Trench off Western Mexico (17°-9°N), *Tectonophysics* 318, 187-200.
- Michaud. F., J. Dañoibeitia, R. Bartolomé, R. Carbonell, L. Delgado Argote, D. Cordoba and T. Monfret (2001), Did the East Pacific rise subduct beneath the North America plate (western Mexico)?, *Geo-Marine Letters*, 20(3), 168-173.
- Michaud F., J. Royer, J. Bourgois, J. Dymont, T. Calmus, W. Bandy, M. Sosson, C. Mortera-Gutiérrez, B. Sichler, M. Rebolledo-Viera, and B. Pontoise (2006) Oceanic-ridge subduction vs. slab break off: Plate tectonic evolution along the Baja California Sur continental margin since 15 Ma, *Geology*, 34(1) 13–16.
- Michaud F., T. Calmus, J. Y. Royer, M. Sosson, B. Bandy, C. Mortera-Gutiérrez, J. Dymont, F. Bigot-Cormier, A. Chabert, and J. Bourgois (2007), Right-lateral active faulting between southern Baja California and the Pacific plate: The Tosco-Abreojos fault. *Special Paper 422: Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*, 422(0) 287–300.
- Moss, R., and Scott, S.D. (1996), Silver in sulfide chimneys and mounds from 13°N and 21°N, East Pacific Rise, *Canadian Mineralogist*, 34(4), 697-716.
- Nixon, G.T. (1982), The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere, *GSA Bulletin*, 93(6), 514-523.
- Norton, I. O. (1995), Plate motions in the North Pacific: The 43 Ma nonevent, *Tectonics*, 14(5), 1080–1094.
- Pardo, M., and G. Suárez (1995), Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications, *J. Geophys. Res.*, 100(B7), 12,357–12,373.
- Pockalny, R. A. (1997), Evidence of transpression along the Clipperton Transform: Implications for processes of plate boundary reorganization, *Earth and Planetary Science Letters*, 146(3-4), 449-464.
- Pockalny, R. A., P. J. Fox, D. J. Fornari, K. C. Macdonald, and M. R. Perfit (1997), Tectonic reconstruction of the Clipperton and Siqueiros Fracture Zones: Evidence and

- consequences of plate motion change for the last 3 Myr, *J. Geophys. Res.*, 102(B2), 3167–3181.
- Righter, K., and J. Rosas-Elgera (2001), Alkaline Lavas in the Volcanic Front of the Western Mexican Volcanic Belt: Geology and Petrology of the Ayutla and Tapalpa Volcanic Fields, *Journal of petrology*, 22(12), 2333–2361.
- Schouten, H., and K. McCamy (1972), Filtering Marine Magnetic Anomalies, *J. Geophys. Res.*, 77(35), 7089–7099.
- Sclater, J. G., R. N. Anderson, and M. L. Bell (1971), Elevation of Ridges and Evolution of the Central Eastern Pacific, *J. Geophys. Res.*, 76(32), 7888–7915.
- Serrato–Díaz, G., W. L. Bandy and C.A. Mortera-Gutiérrez (2004), Active rifting and crustal thinning along the Rivera-Cocos plate boundary as inferred from Mantle Bouguer gravity anomalies, *Geofísica Internacional*, 43, 361-381.
- Suárez, G., D. Escobedo, W. L. Bandy, and J. Pacheco (1999), The 11 December, 1995 (Mw 6.4) earthquake on the Rivera-Cocos plate boundary: Implications for their present-day relative motion, *Geophysical Research Letters*, 26, 1957-1960.
- Stock, J. M., and J. Lee (1994), Do microplates in subduction zones leave a geological record?, *Tectonics*, 13(6), 1472–1487.
- Thorkelson, D. J. (1996), Subduction of diverging plates and the principles of slab window formation *Tectonophysics*, 255(1-2), 47-63.
- Tucholke, B.E., and H. Schouten (1988), Kane Fracture Zone, *Marine Geophysical Researches*, 10(1-2), 1-39.
- Vannucchi, P., S. Galeotti, P.D. Clift, C.R. Ranero, and Roland von Huene (2004), Long-term subduction-erosion along the Guatemalan margin of the Middle America Trench, *Geology*, 32(7), 617–620.
- Van Der Lee, S. and G. Nolet (1997), Seismic image of the subducted trailing fragments of the Farallon plate, *Nature*, 386(6622), 266-269.
- Von Huene, R., C.R. Ranero, and P.Vannucchi (2004), Generic model of subduction erosion. *Geology*, 32(10), 913-916.
- Whitmarsh, R. B., and M. T. Jones (1969), Daily Variation and Secular Variation of the Geomagnetic Field from Shipboard Observations in the Gulf of Aden, *Geophysical Journal International* 18(5), 477–488.
- Wilson D. S. (1990), Kinematics of overlapping rift propagation with cyclic rift failure, *Earth and Planetary Science Letters*, 96(3-4), 384-392.
- Wilson J. T. (1965), Transform faults, oceanic ridges, and magnetic anomalies Southwest of Vancouver Island, *Science*, 150(3695), 482-485.

ANEXO 1. PROCEDIMIENTO DETALLADO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CORRECCIONES MAGNÉTICAS DIURNAS Y POR RUMBO.

Correcciones diurnas.

El procedimiento para la corrección diurna del crucero MARTIC04 se realiza a partir de los datos de la estación base de Manzanillo, comenzando con los datos de las Figuras 22 y 24 que se encuentran en el cuerpo del trabajo. Luego se eliminaron los datos no influenciados por tormentas magnéticas (Figura 61) pero aun así se observa la presencia de unos días sin datos y unos días con perturbaciones antrópicas.

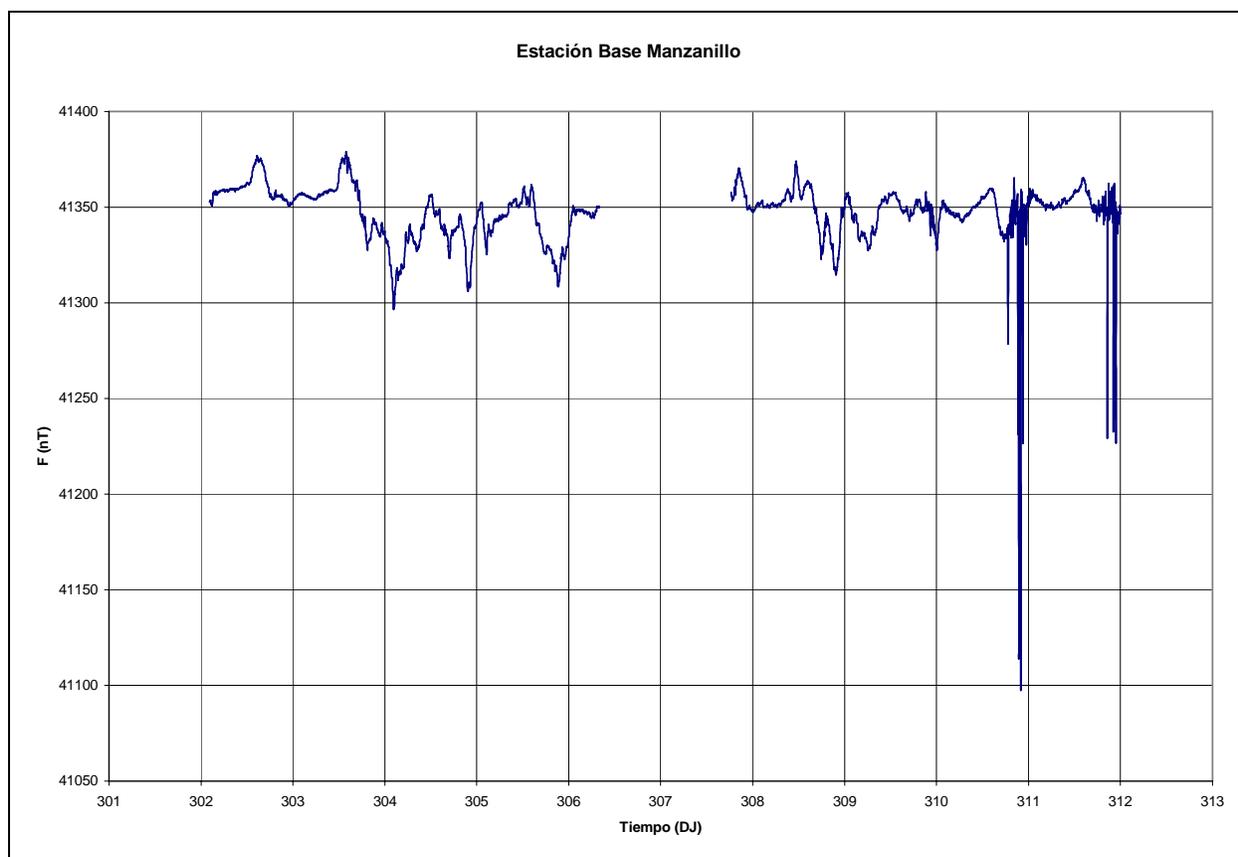


Figura 61. Grafica del campo magnético total (F) de la estación Base de Manzanillo de DJ-302 al D-J311 correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC04. Datos sin influencia de tormenta magnética.

Para corregir los datos magnéticos marinos de la influencia diurna, es necesario tener una serie de tiempo continua y sin perturbaciones antrópicas en la estación base. La serie de tiempo de la estación base de Manzanillo se puede complementar y acondicionar con los datos del Observatorio Magnético de Teoloyucan (Figura 26, en el cuerpo del trabajo) para el mismo periodo de tiempo. Al visualizar ambos conjuntos de datos en una sola grafica (Figura 62), se observa una alta similitud, lo que sumado a las características y propiedades del Observatorio, ya mencionadas en el cuerpo del trabajo permiten reconstruir (Figura 63) hasta cierto punto la serie de tiempo de la estación base de Manzanillo.

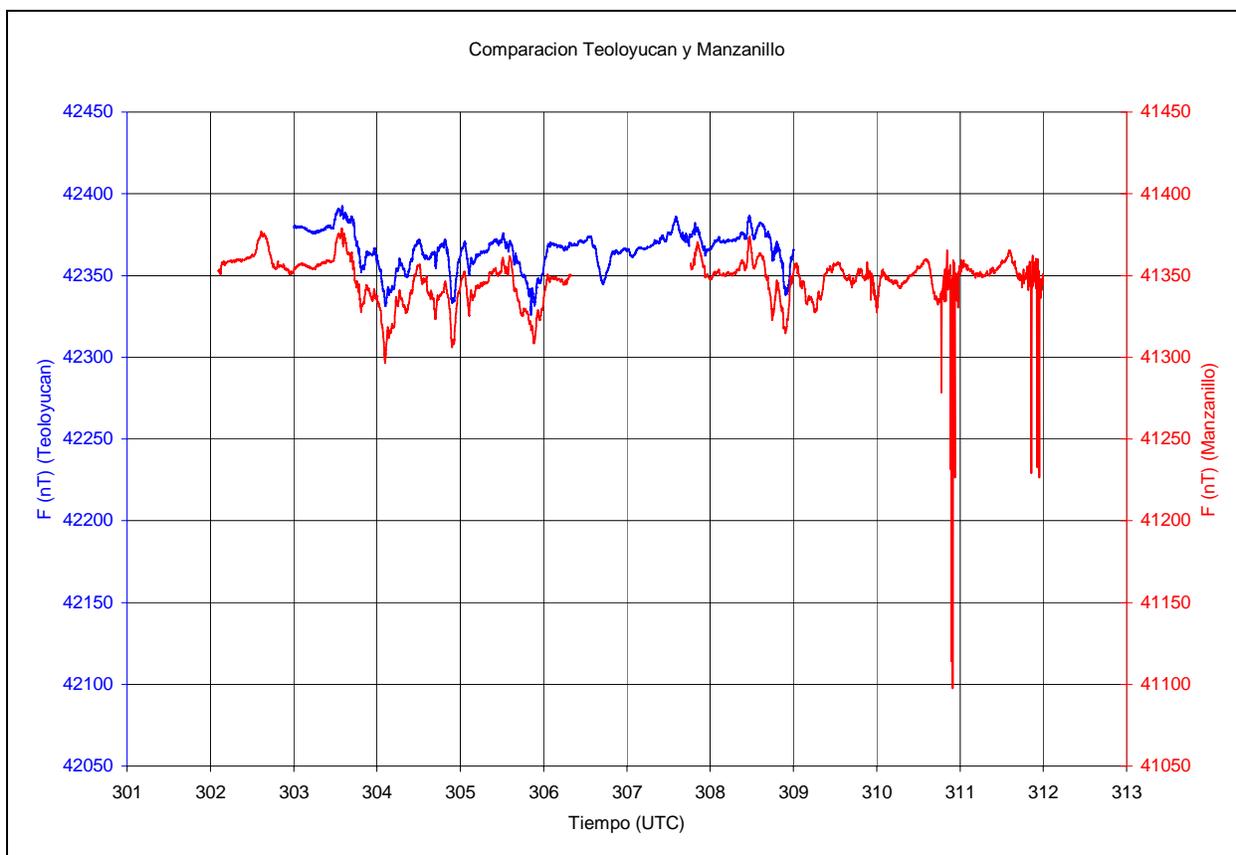


Figura 62. Grafica del campo magnético total (F), comparando los datos del observatorio magnético de Teoloyucan contra los datos de la estación base de Manzanillo correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC04.

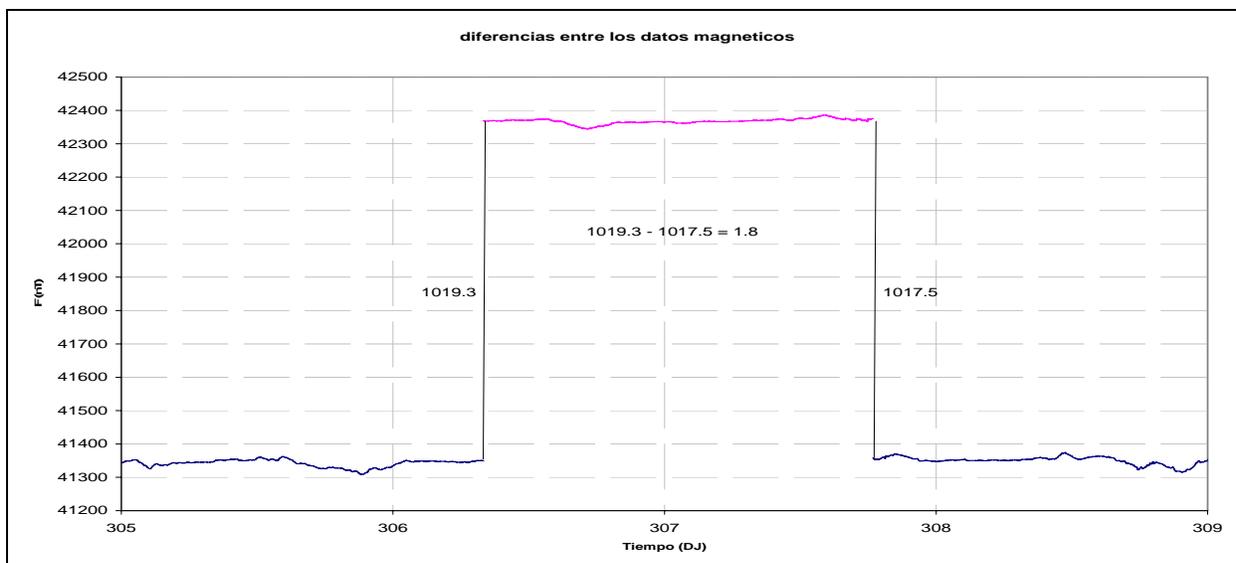


Figura 63. Grafica que muestra las diferencias en magnitud del campo magnético total (F), entre los datos de la estación magnética base de Manzanillo (en azul), y los datos del observatorio geomagnético de Teoloyucan (en rosa).

En la Figura 63 se observa la redefinición de la serie de tiempo para la estación base de Manzanillo. Esta corrección se realizó: primero, desplazando todos los datos del Observatorio de Teoloyucan, un valor constante (1019.3 nT) para fijar el punto de la izquierda al mismo nivel de los datos de Manzanillo. Luego se identificó una diferencia de tan solo 1.8 nT, en el punto de la derecha, diferencia que se resolvió repartiéndola entre los 2065 datos que se poseen para el Observatorio de Teoloyucan durante el período de tiempo que no tiene información, quedando así totalmente definida la serie de la estación base de Manzanillo, (Figura 64).

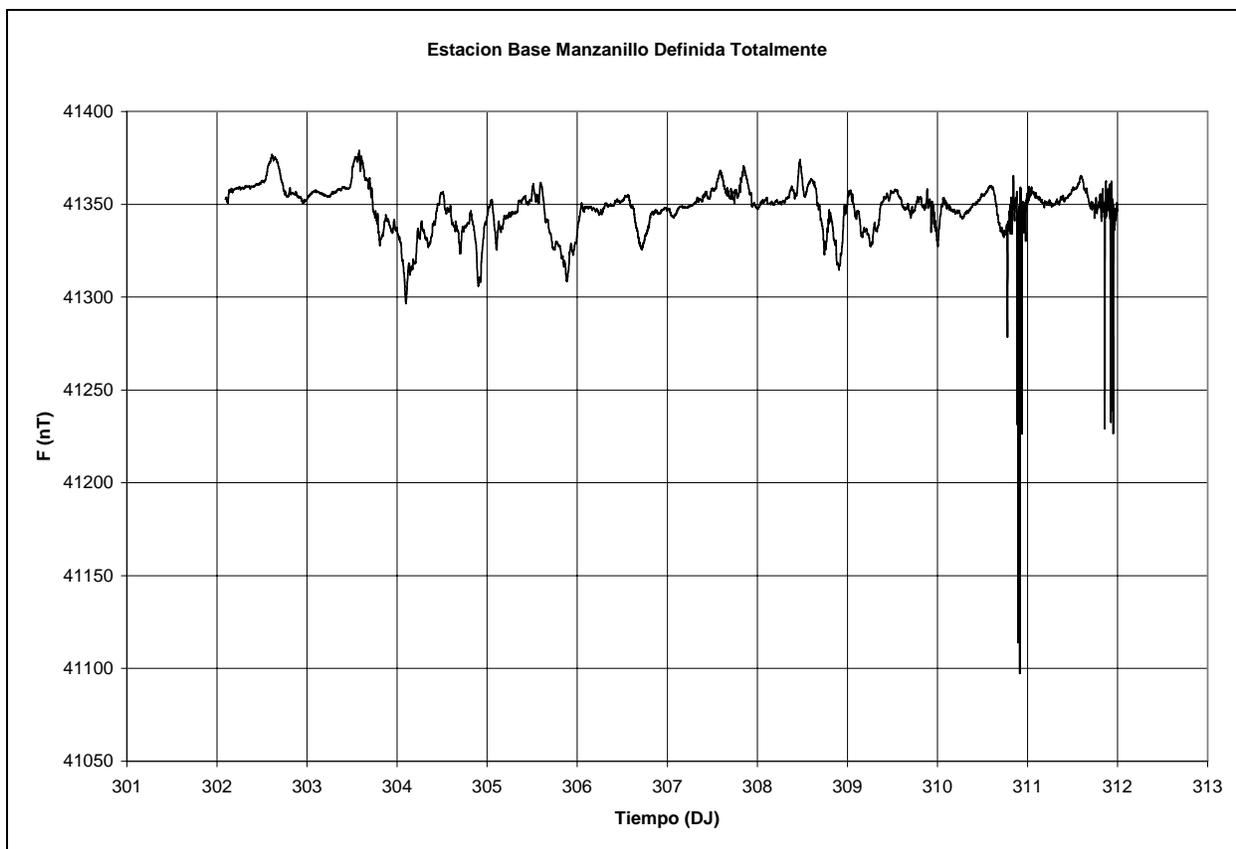


Figura 64. Grafica del campo magnético total (F), de la estación base de Manzanillo del DJ-302 al DJ-311, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC04, definida totalmente mediante datos del observatorio geomagnético de Teoloyucan.

Con el propósito de eliminar las perturbaciones antrópicas conservando el patrón original, se realizó una interpolación de la serie de datos, mediante un proceso de prueba y error, procurando a su vez que la serie de tiempo se filtre en algunas de las altas frecuencias (Figura 65). Posteriormente se aplica el filtro para quitar el resto de las altas frecuencias (Figura 66). El procedimiento de interpolación se realizó antes de aplicar el filtro para eliminar las altas frecuencias, ya que sin la interpolación previa, no se conserva el patrón original.

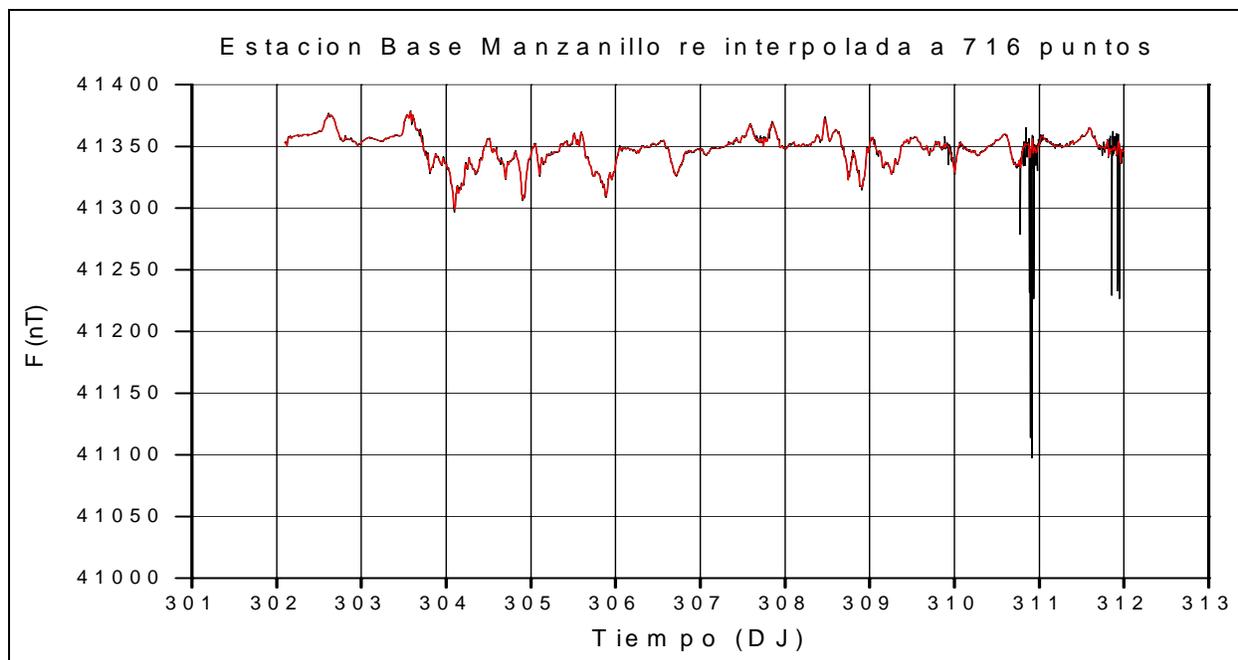


Figura 65. Grafica del campo magnético total (F), de la estación base de Manzanillo, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC04, reinterpelados a 716 puntos para poder eliminar los efectos en días con perturbaciones antrópicas (DJ 310 y 311) y mucha parte de las altas frecuencias que no son de nuestro interés.

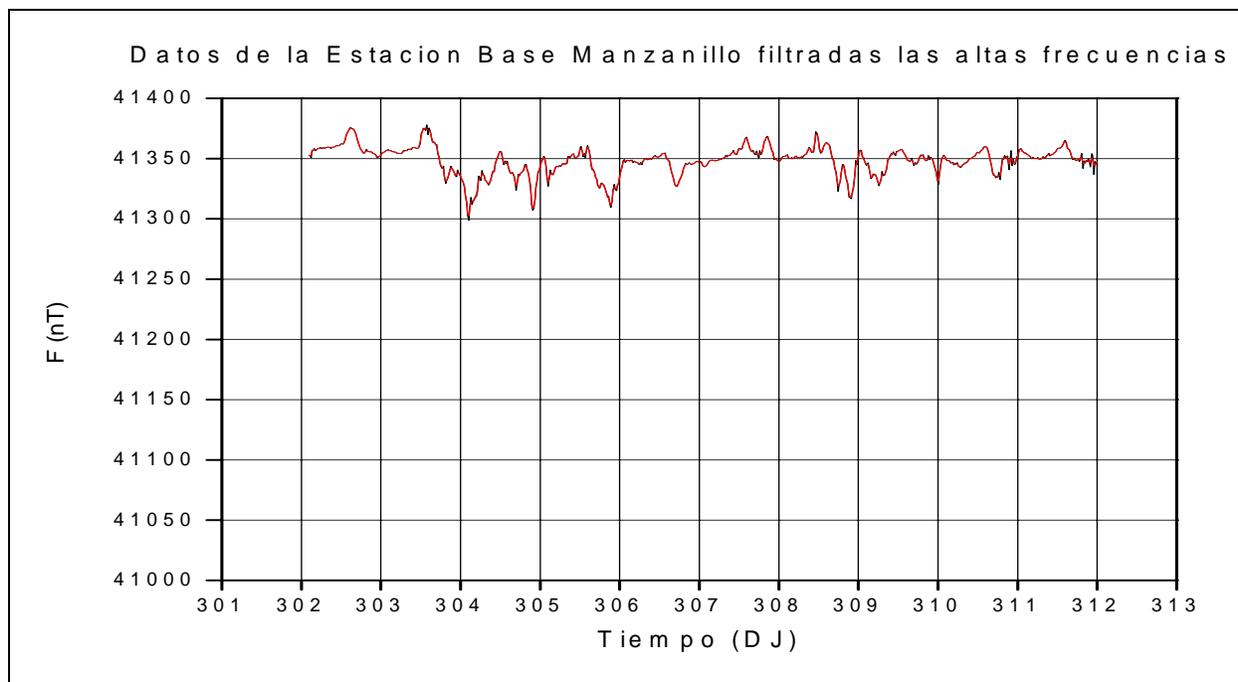


Figura 66. Grafica del campo magnético total (F), de la estación base de Manzanillo, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC04, filtradas las altas frecuencias.

Teniendo ya la serie de tiempo redefinida y filtrada, se remuestrea matemáticamente a 2 segundos (Figura 27 en el cuerpo del trabajo) para igualarla con el intervalo de muestreo de las series de tiempo de los datos magnéticos marinos.

Luego los datos se reducen respecto al valor del campo magnético teórico IGRF de la estación base (Figura 67), se reducen al mínimo y por último se redefinen a un origen fijo (Figura 68), el cual se determina en función de las zonas de menor influencia de los días no perturbados en la estación base (Figura 29, en el cuerpo del trabajo, para la estación base de Manzanillo). Los datos son comparados con el DTS, para corroborar la naturaleza de las variaciones relativas diurnas. Sobre estos datos se realiza luego la corrección diurna de los datos magnéticos marinos.

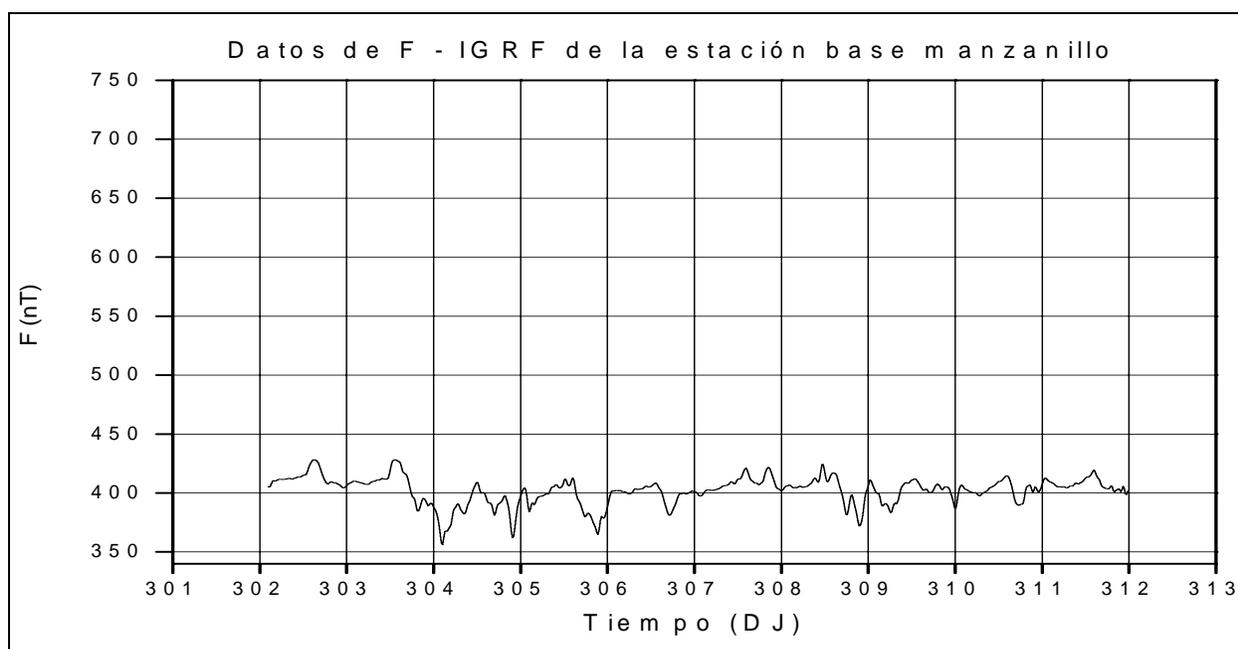


Figura 67. Grafica del campo magnético total (F), menos los datos teóricos IGRF de la estación base de Manzanillo. Correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC04

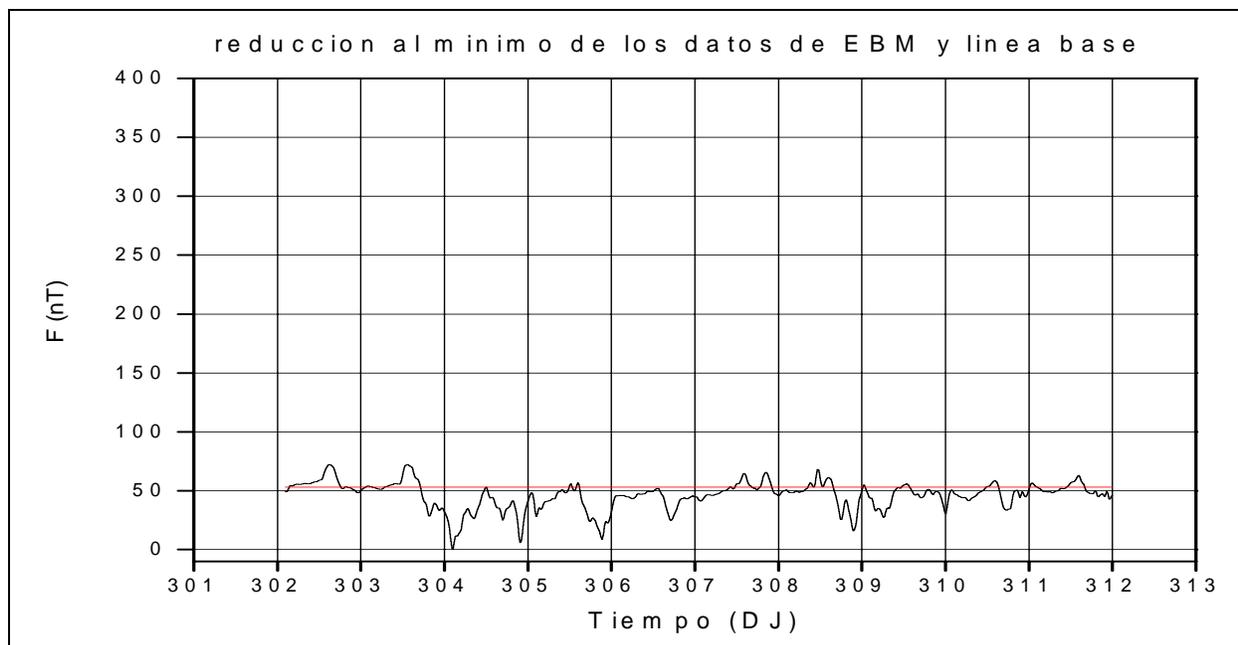


Figura 68. Reducción al mínimo de los datos y establecimiento de la línea base (línea roja) para la variación diurna para el cruceo MARTIC04

La Figura 29, en el cuerpo del trabajo, contiene dos gráficas en las que se observa, comparandolas, que el nivel base es muy similar, lo que nos indica que los datos usados y el nivel base propuesto, son los adecuados para realizar la corrección diurna de los datos.

La corrección diurna para el cruceo MARTIC05, se realiza siguiendo el mismo procedimiento y bajo las mismas consideraciones utilizadas para MARTIC04, descritas anteriormente. Sin embargo en el proceso no fueron necesarios los pasos iniciales, ya que en la serie de tiempo de la estación base de Chamela no se presentan perturbaciones o irregularidades antrópicas.

A continuación se muestran en forma consecutiva las gráficas correspondientes al proceso realizado para la corrección diurna de los datos magnéticos marinos, para el cruceo MARTIC05. Se comienza con las Figuras 23 y 25, que representan los datos totales de la estación base y el DST de las series de tiempo para el periodo correspondiente al cruceo MARTIC05, pasando directamente a los procesos de filtrado de las altas frecuencias (Figuras 69 y 70). Con la serie de tiempo redefinida y filtrada,

se remuestrea matemáticamente a 2 segundos (Figura 28 en el cuerpo del trabajo) para igualarla con el intervalo de muestreo de los datos magnéticos marinos. Luego los datos se reducen respecto al valor del campo magnético teórico IGRF (Figura 71), y al valor mínimo de la estación base (Figura 72). Por último los datos se redefinieron a un origen fijo (Figura 30, en el cuerpo del trabajo) y se compararon con el DTS para corroborar la naturaleza de las variaciones relativas diurnas. Lo anterior permite establecer que los datos de de la Figura 30 y el respectivo nivel base seleccionado son los adecuados para realizar la corrección diurna para MARTIC05.

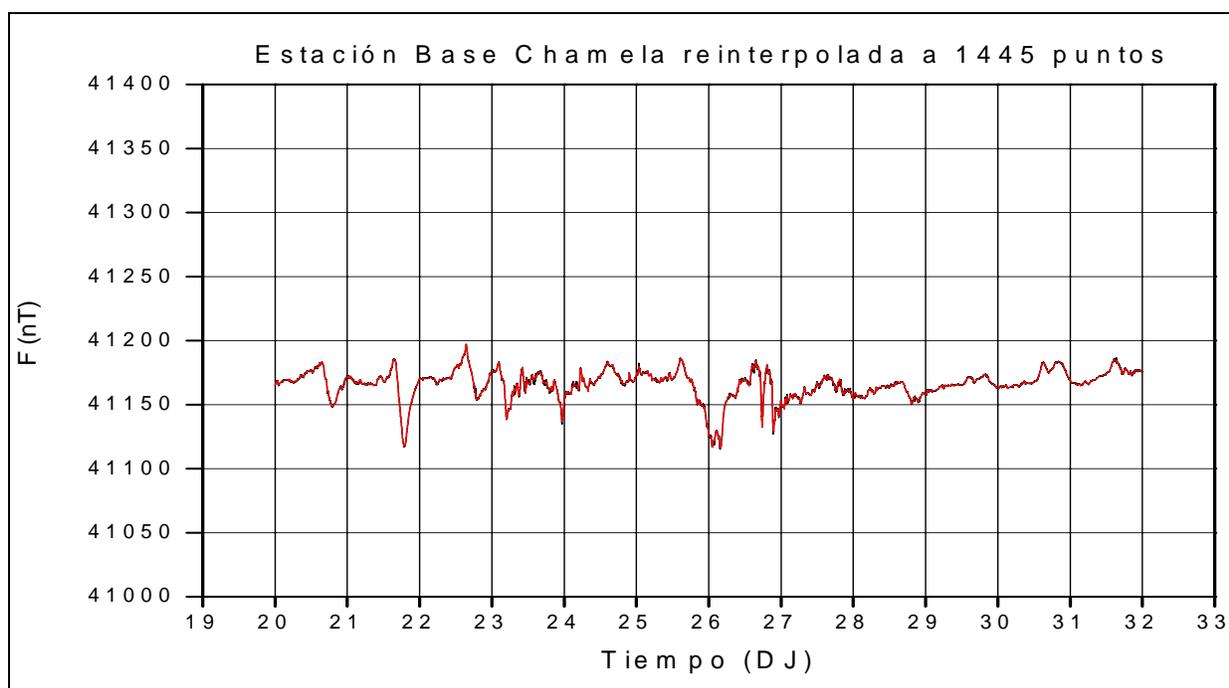


Figura 69. Grafica del campo magnético total (F) de la estación base de Chamela, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC05, reinterpelados a 867 puntos para poder eliminar los efectos en días con perturbaciones y mucha parte de las altas frecuencias que no son de nuestro interés.

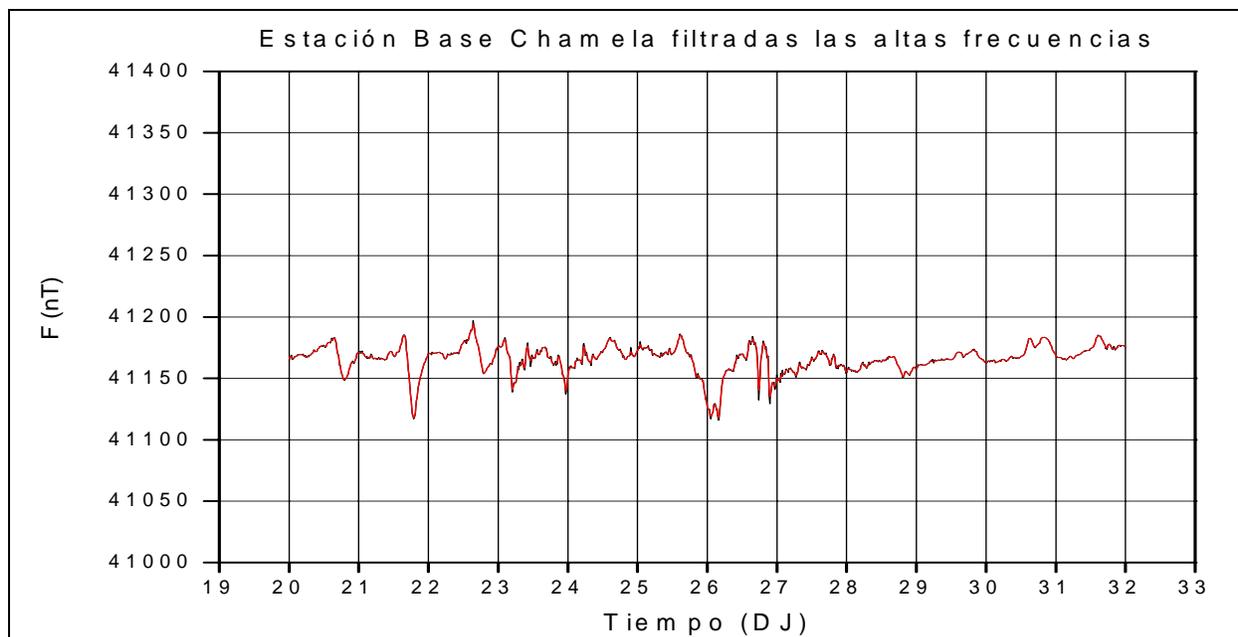


Figura 70. Grafica del campo magnético total (F) de la estación base de Chamela, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC05, filtradas las altas frecuencias.

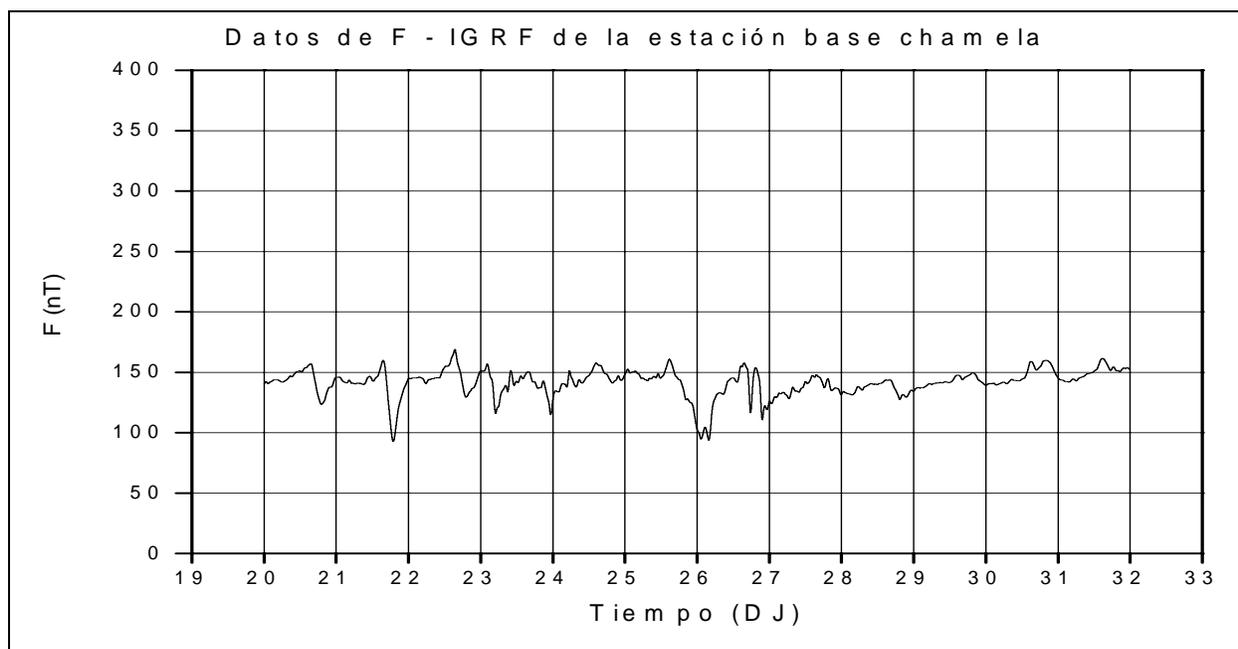


Figura 71. Grafica del campo magnético total (F), menos los datos teóricos IGRF de la estación base de Chamela, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el crucero MARTIC05.

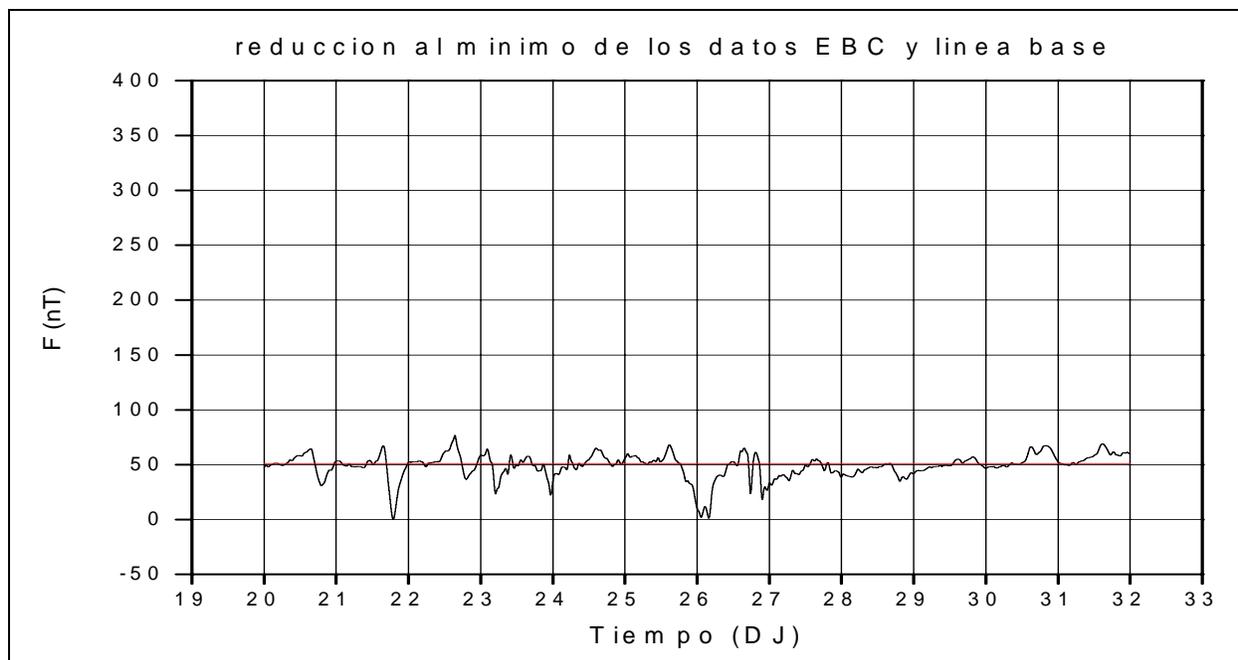


Figura 72. Reducción al mínimo de los datos y establecimiento de la línea base (línea roja) para la variación diaria, correspondientes a los días de adquisición de datos durante el cruceo MARTIC05.

Correcciones por rumbo.

Entre los datos de los círculos de calibración para MARTIC04 y MARTIC05 hay diferencias sustanciales. La serie de datos de MARTIC05 es muy similar a las series de datos de las correcciones por rumbo de los artículos consultados [e.g., *Buchanan et al.*, 1996 y *Bullard and Mason*, 1961]. La serie de datos para la corrección por rumbo de MARTIC04, no se asemeja en nada con los datos de MARTIC05, aun así esto no indica que esta serie de datos no pueda ser usada para realizar las correcciones por rumbo correspondientes para MARTIC04, ya que los datos fueron tomados teniendo las mismas consideraciones que en MARTIC05 y se asemejan a las graficas mostradas al menos por *Eggers and Thompson* [1984] y *Whitmarsh and Jones* [1969].

La corrección por rumbo para MARTIC04, se determina mediante la variación del campo magnético observado en los círculos de calibración respecto al rumbo del barco, tal como se observa en la Figura 32, en el cuerpo del trabajo. De nuevo estos datos

fueron reducidos respecto al IGRF (Figura 73) y corregidos respecto a las variaciones relativas diurnas (Figura 74)

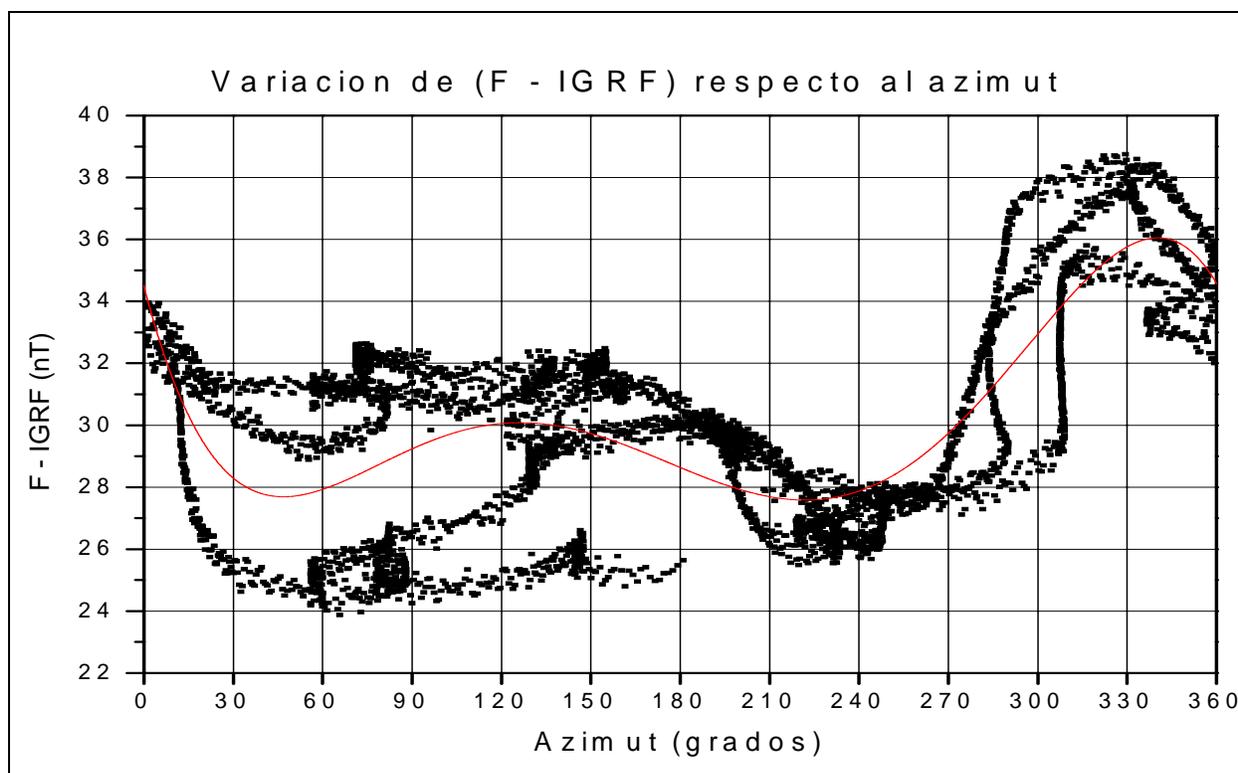


Figura 73. Gráfica del [campo magnético total (F), menos los datos teóricos (IGRF)] vs. [dirección del magnetómetro], en el círculo de calibración para MARTIC04

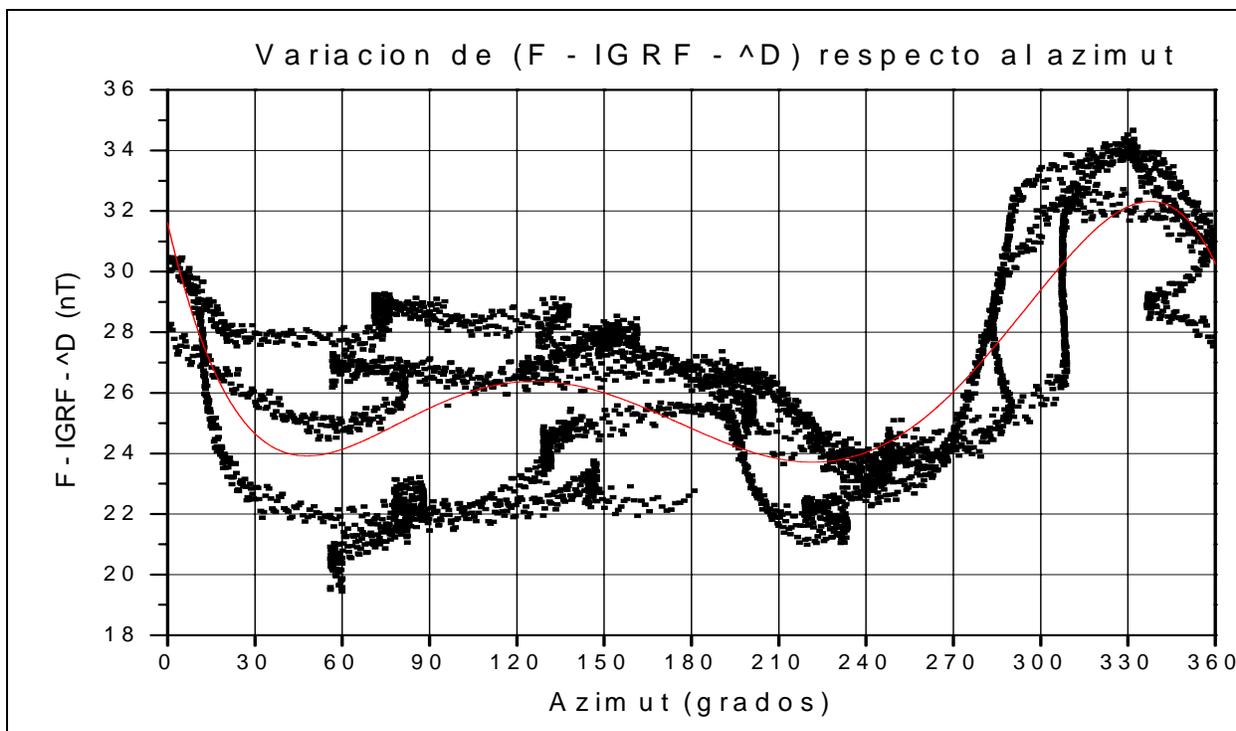


Figura 74. Grafica de los [datos magnéticos (F), menos los datos teóricos (IGRF), menos la variación diaria (Δ diurna)] vs. [dirección del magnetómetro], en el círculo de calibración para MARTIC04

Para encontrar la influencia relativa del rumbo, en los datos magnéticos correspondiente al círculo de calibración del crucero MARTIC04, de una manera práctica (Figura 34 en el cuerpo del trabajo), se realizó una aproximación mediante el método de mínimos cuadrados con la forma de la ecuación dada por *Bullard and Mason* [1961]. Luego se usaron, para este crucero, los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 como lo indica *Bullard and Mason* [1961] para obtener la ecuación con la cual se realizan las correcciones por rumbo $\Delta Fm_{rumbo}(\theta)$, Ecuación 8b en el cuerpo del trabajo.

La Ecuación 8b representa una curva que continúa ajustándose a los datos magnéticos del círculo de calibración respecto al rumbo (Figura). Esta curva se normalizó al valor correspondiente al norte (Figura 36, en el cuerpo del trabajo), tal como lo hicieron *Buchanan et al.* [1996] (rumbos magnéticos y norte magnético). Mediante la curva de la Figura 36 se obtuvieron los valores de las variaciones relativas según un rumbo dado $\Delta_R Fm_{rumbo}(\theta)$.

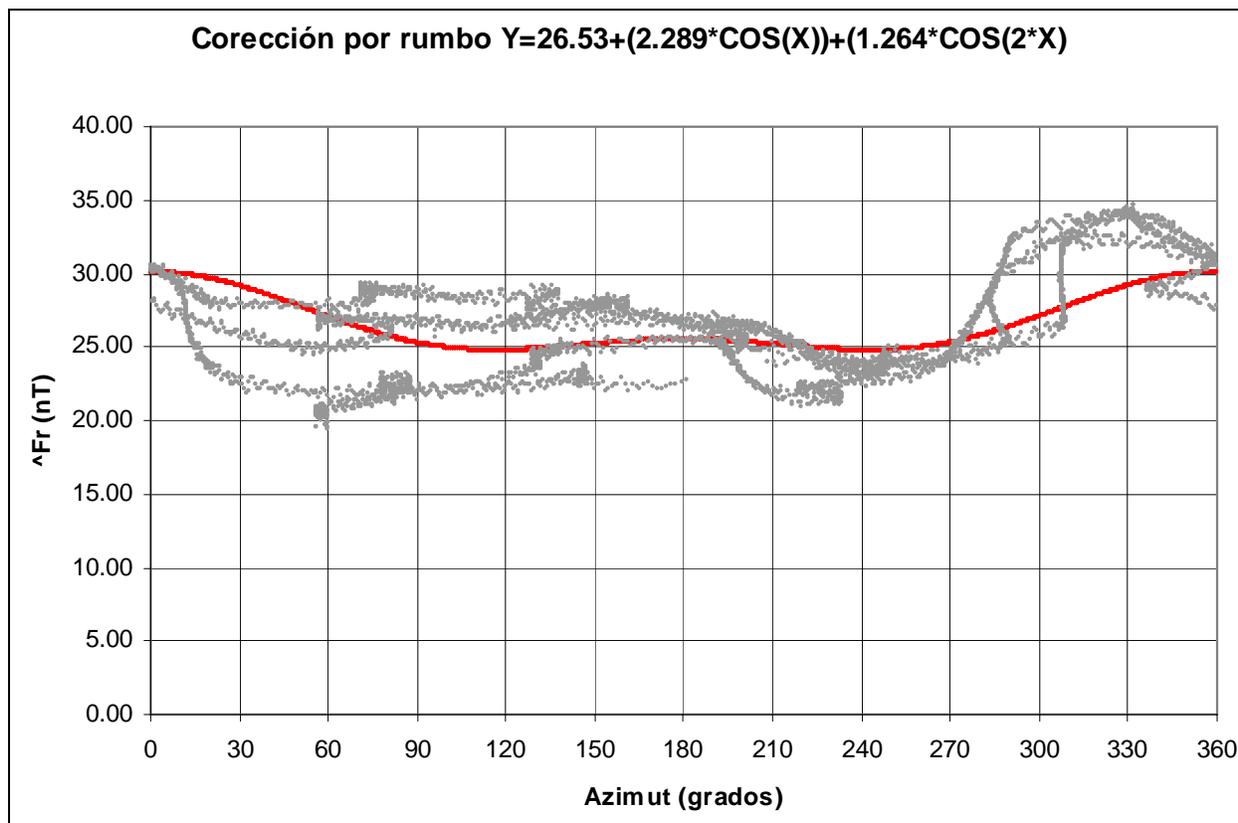


Figura 75. Curva (línea roja) que muestra la ecuación de ajuste obtenida para la corrección por rumbo según *Bullard and Mason* [1961] para MARTIC04.

La corrección por rumbo para el crucero MARTIC05, se realiza siguiendo el mismo procedimiento y bajo las mismas consideraciones utilizadas para MARTIC04, descritas anteriormente.

A continuación se muestran en forma consecutiva las gráficas que corresponden al procedimiento realizado para el crucero MARTIC05, sobre los datos de los círculos de calibración para obtener las correcciones por rumbo. Este procedimiento se inicia con la Figura 31 en el cuerpo del trabajo, que muestra el campo magnético total (F) vs. la dirección del magnetómetro. El procedimiento continúa con la reducción de los datos respecto al IGRF y con la corrección respecto a las variaciones relativas diurnas (Figuras 76 y 77), obteniéndose una serie de datos en relación al rumbo del barco. A esta serie de datos se le realizó un ajuste (Figura 33, en el cuerpo del trabajo) que da como resultado la Ecuación 7. De esta ecuación, tal como lo indica *Bullard and Mason*

[1961], se usan los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 , para obtener la Ecuación 8a, a partir de la cual se realizan las correcciones por rumbo.

Finalmente esta curva se normaliza al valor correspondiente al norte (Figura 35, en el cuerpo del trabajo) ya que, como se puede observar, ésta continúa ajustándose a los datos magnéticos del círculo de calibración respecto al rumbo (Figura 78).

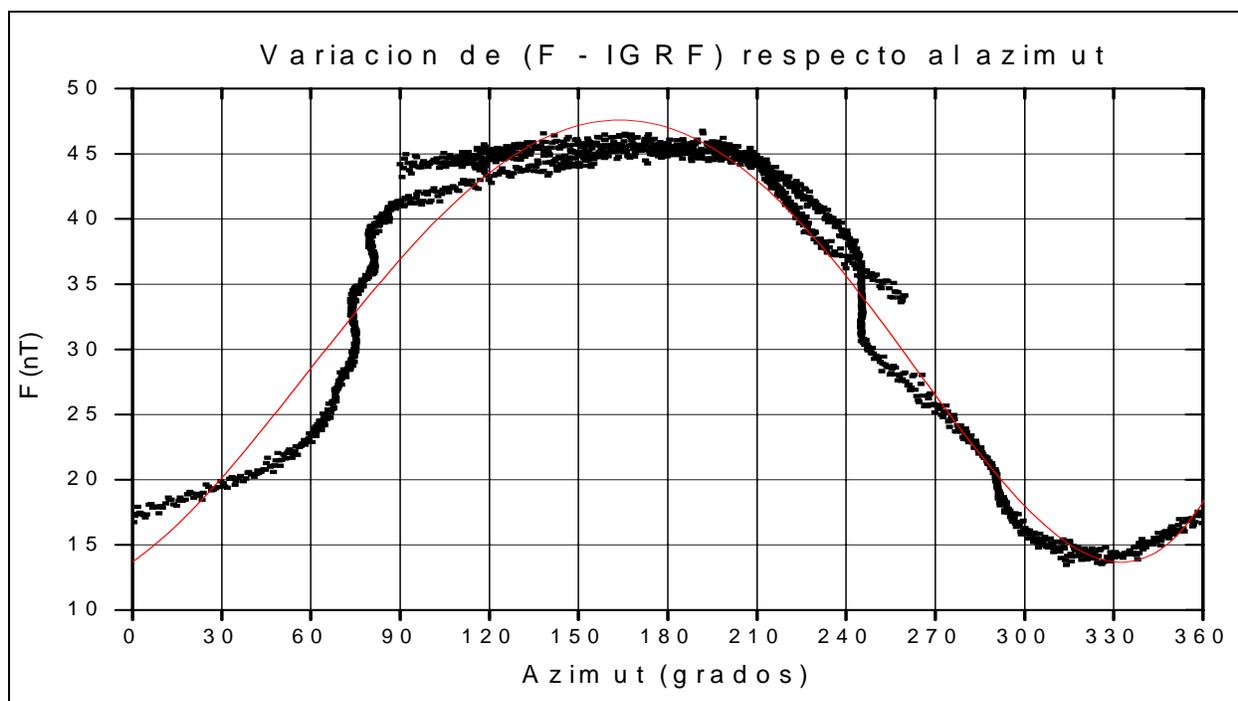


Figura 76. Gráfica del [campo magnético total (F), menos los datos teóricos (IGRF)] vs. (dirección del magnetómetro), en el círculo de calibración para MARTIC05

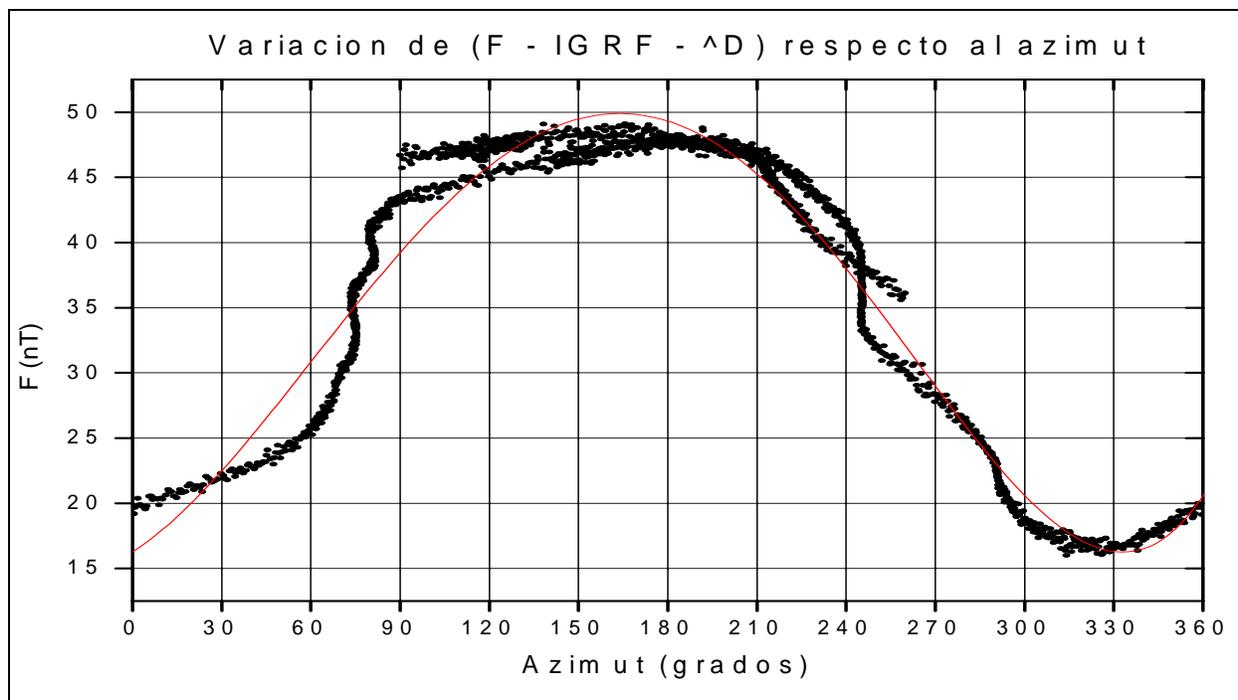


Figura 77. Gráfica del [campo magnético total (F), menos los datos teóricos (IGRF), menos la variación diaria (Δ diurna)] vs. [dirección del magnetómetro], en el círculo de calibración para MARTIC05.

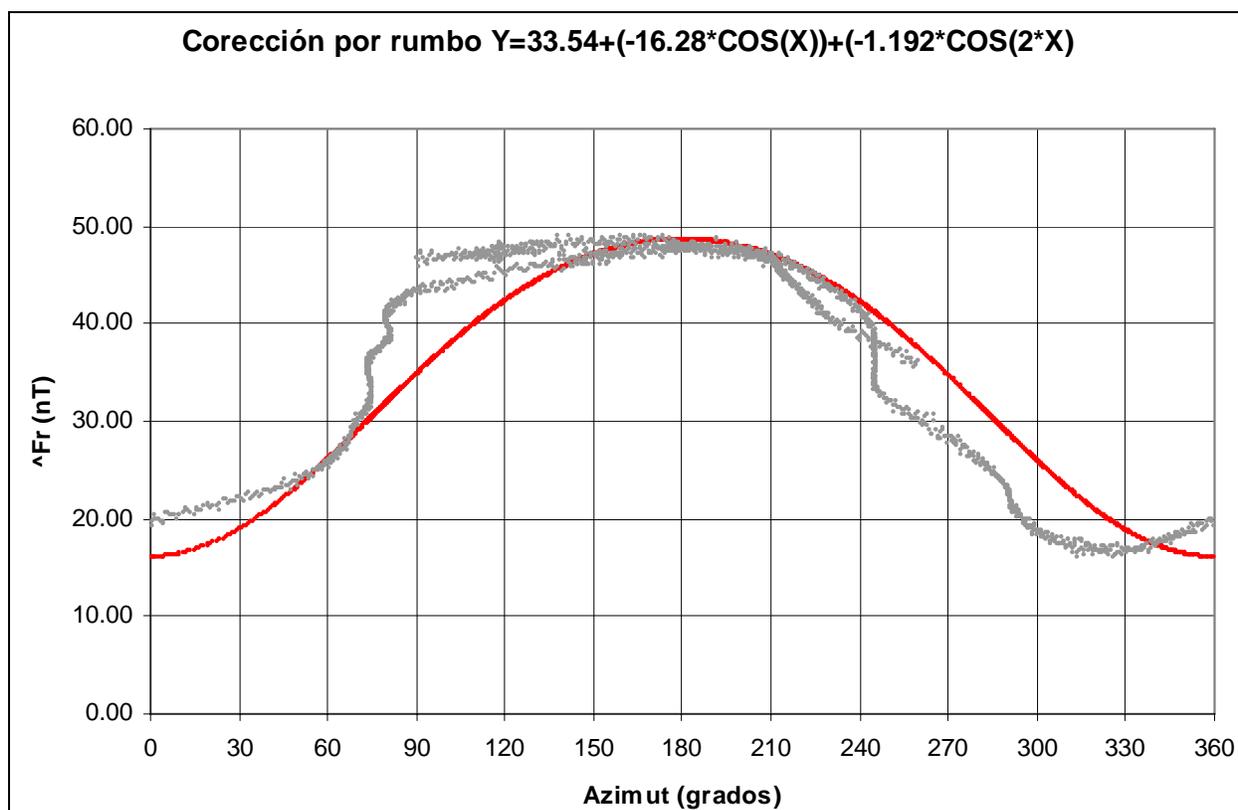


Figura 78. Curva (línea roja) que muestra la ecuación de ajuste obtenida para la corrección por rumbo según *Bullard and Mason* [1961] para MARTIC05.

ANEXO 2. MECANISMOS FOCALES

Se descargaron los datos de los mecanismos focales para la zona de estudio entre los 17° N y 20° N de latitud y los 104° W y 107° W de longitud, de las bases de datos disponibles en <http://neic.usgs.gov/neis/sopar/> del USGS y de <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> de HARVARD.

De la base de datos del USGS se obtuvieron 57 sismos desde 1982 hasta el presente tal como se observa en la Tabla 1, datos que fueron adquiridos con los siguientes parámetros:

Source Parameter Search Results Wed Jul 11 17:42:11 UTC 2007 FM Format Depth Range: 0 to 1000 Latitude Range: 17 to 20 Longitude Range: -107 to -104

Tabla 1 Datos para sismos en la zona de estudio descargados de la base de datos NEIC del USGS.

#ID	EPICENTER								MOMENT			PRINCIPAL AXES						NODAL PLANES						% DC	SRC						
	DATE			TIME (UTC)			LAT	LONG	SRC	DEPTH	Mw	VAL EX	T			N			P			1				2					
	YR	MO	DA	HR	MIN	SEC	deg	deg		km			VAL	PL	AZM	VAL	PL	AZM	VAL	PL	AZM	STK	DP			SLIP	STK	DP	SLIP		
1	1982	8	18	3	58	20.4	18.07	-105.7	HRV	15	5.4	1.5	17	1.68	0	236	-0.29	90	180	-1.38	0	146	281	90	180	11	90	0	65	HRV	
2	1982	10	25	15	55	20.6	18.43	-105.99	HRV	15	5.3	1.1	17	1.11	9	265	0.05	79	127	-1.17	8	356	41	79	1	311	89	169	91	HRV	
3	1986	11	9	15	0	46	18.83	-106.73	HRV	15	5.4	1.4	17	1.5	0	235	-0.26	90	180	-1.24	0	145	280	90	180	10	90	0	65	HRV	
4	1988	8	3	17	30	13.2	18.8	-106.5	HRV	15	5.5	1.8	17	1.94	0	241	-0.36	90	180	-1.58	0	151	286	90	180	16	90	0	63	HRV	
5	1989	4	19	14	49	2.1	17.99	-105.47	HRV	15	5.8	5.2	17	5.4	6	82	-0.47	84	254	-4.93	1	352	127	85	176	217	86	5	83	HRV	
6	1989	4	28	2	34	27.1	17.96	-105.22	HRV	15	5.6	3.2	17	3.28	7	246	-0.08	72	357	-3.19	17	153	291	73	-173	198	83	-17	95	HRV	
7	1989	8	29	4	16	23.02	18.039	-105.667	PDE	75	6.4	4.8	18	4.83	12	57	0	77	260	-4.83	5	148	193	78	5	102	85	168	100	GS	
8	1989	8	29	4	16	25.7	17.88	-105.65	HRV	15	6.5	6.9	18	6.91	17	57	-0.09	72	227	-6.82	3	326	100	76	170	193	80	14	97	HRV	
9	1989	12	8	2	26	1.9	19.25	-105.14	HRV	15	5.5	1.9	17	2.07	48	8	-0.37	21	122	-1.71	35	227	13	22	162	120	83	69	64	HRV	
10	1990	1	5	18	27	0.2	18.54	-106.83	HRV	15	6	1	18	1.02	0	239	-0.02	90	180	-1	0	149	284	90	-180	14	90	0	96	HRV	
11	1991	1	1	0	6	31.4	18.068	-105.847	PDE						10	68						0	158	203	83	7	112	83	173		GS
12	1991	1	1	0	6	37.5	18.36	-106.01	HRV	15	6.3	2.8	18	2.7	0	230	0.11	90	180	-2.8	0	140	275	90	-180	5	90	0	92	HRV	
13	1991	1	1	3	19	38.6	18.37	-105.93	HRV	15	5.8	5	17	5.22	0	230	-0.44	90	180	-4.78	0	140	275	90	-180	5	90	0	83	HRV	
14	1991	11	11	17	46	3.3	18.08	-105.89	HRV	15	5.9	9.3	17	9.45	0	235	-0.36	90	180	-9.09	0	145	280	90	-180	10	90	0	92	HRV	
15	1992	12	17	9	19	13.6	18.05	-105.45	HRV	15	5.4	1.5	17	1.39	0	236	0.15	90	180	-1.55	0	146	281	90	-180	11	90	0	81	HRV	
16	1995	10	6	5	13	32.3	19.15	-104.25	HRV	17	5.8	5.8	17	5.6	67	54	0.45	8	304	-6.05	21	210	285	25	70	127	66	99	85	HRV	
17	1995	10	9	15	35	53.91	19.055	-104.205	PDE	4	7.9	9.1	20	8.92	49	25	0.44	5	289	-9.36	40	195	242	7	43	110	85	95	91	GS	
18	1995	10	9	15	36	28.8	19.34	-104.8	HRV	15	8	1.1	21	1.16	54	30	-0.02	0	120	-1.13	36	211	302	9	92	120	81	90	97	HRV	
19	1995	10	12	16	52	53	18.81	-104.017	PDE	21	5.8	7.3	17	8.54	64	28	-2.51	3	124	-6.02	25	215	311	20	98	123	70	87	41	GS	
20	1995	10	12	16	53	1.7	18.81	-104.07	HRV	20	6	1	18	0.97	65	52	0.16	8	305	-1.13	23	212	286	23	70	128	69	98	72	HRV	
21	1995	10	18	23	2	13.2	19.06	-105.22	HRV	16.8	5.5	1.9	17	1.78	60	71	0.17	16	311	-1.95	25	213	273	25	49	137	71	107	83	HRV	
22	1995	11	21	8	58	33	18.93	-105.67	HRV	32	5.4	1.3	17	1.23	9	212	0.06	81	22	-1.3	2	121	256	83	175	347	85	7	91	HRV	
23	1995	12	11	14	9	23.79	18.926	-105.471	PDE	13	6.3	4	18	3.98	16	48	0	74	217	-3.98	3	318	92	77	171	184	81	14	100	GS	
24	1995	12	11	14	9	26.1	18.84	-105.75	HRV	15	6.3	3.4	18	3.58	18	40	-0.37	71	201	-3.21	6	308	83	74	171	175	82	17	79	HRV	
25	1995	12	11	19	11	41.3	18.86	-105.74	HRV	15	5.8	5.2	17	5.02	5	32	0.42	72	136	-5.44	17	301	77	75	-171	345	81	-15	85	HRV	
26	1995	12	11	19	44	9.21	18.583	-105.517	PDE	11	6.1	1.6	18	1.66	15	54	-0.06	73	200	-1.6	9	322	97	73	176	188	86	17	93	GS	
27	1995	12	11	19	44	11.8	18.71	-105.68	HRV	15	6.1	1.5	18	1.49	6	38	0.07	77	156	-1.55	12	307	83	77	-176	352	86	-13	91	HRV	
28	1996	5	9	21	54	20.9	18.83	-104.18	HRV	15	5.3	9.9	16	0.89	69	92	0.19	18	306	-1.08	11	213	281	37	60	137	58	111	65	HRV	
29	1997	4	8	15	23	47.7	18.99	-106.73	HRV	15	5.6	2.4	17	2.8	9	52	-0.77	73	175	-2.03	14	320	96	73	-177	5	87	-17	45	HRV	
30	1999	4	23	8	58	56.7	18.09	-105.14	HRV	15	5.4	1.2	17	1.31	32	277	-0.28	51	57	-1.03	21	174	312	52	171	48	83	39	57	HRV	
31	2000	3	7	4	32	22.1	19.46	-104.08	HRV	15	5.4	1.2	17	1.08	10	108	0.23	14	15	-1.31	72	233	215	37	-66	6	57	-107	65	HRV	
32	2000	12	9	17	1	4	18.17	-105.48	HRV	15	5.3	1.1	17	0.96	0	243	0.19	90	180	-1.15	0	153	288	90	-180	18	90	0	67	HRV	
33	2001	4	29	21	26	54.54	18.736	-104.545	PDE	14	5.9	8.8	17	8.86	35	15	-0.13	55	183	-8.73	6	281	52	62	158	153	71	30	97	GS	
34	2001	4	29	21	27	7.2	18.71	-104.74	HRV	15	6.2	1.9	18	1.96	63	42	-0.04	4	304	-1.92	27	212	292	18	77	126	72	94	96	HRV	
35	2001	5	8	5	15	42.8	18.72	-104.15	HRV	34.2	5.5	2.3	17	2.06	66	51	0.39	8	303	-2.45	23	209	284	23	69	126	68	99	68	HRV	
36	2001	5	20	4	21	43.82	18.816	-104.446	PDE	21	6.2	2.4	18	2.43	54	52	0	23	287	-2.43	26	185	235	28	34	114	75	113	100	GS	
37	2001	5	20	4	21	50.7	18.62	-104.57	HRV	15	6.3	3.6	18	3.62	61	44	0.03	5	306	-3.66	29	213	290	17	73	127	74	95	98	HRV	
38	2002	11	5	14	5	13.9	19.21	-104.75	HRV	15	5.3	9	16	8.75	24	218	0.44	17	315	-9.19	60	77	277	26	-131	141	71	-72	90	HRV	
39	2002	11	23	2	33	3.8	18.95	-106.65	HRV	15	5.4	1.5	17	1.47	5	238	0.07	78	355	-1.54	11	147	283	79	-176	192	86	-12	91	HRV	
40	2002	11	23	2	53	13.6	18.73	-106.91	HRV	15	5.4	1.3	17	1.17	6	64	0.34	71	318	-1.51	18	156	199	73	-9	291	81	-163	55	HRV	
41	2003	1	22	2	6	34.61	18.77	-104.104	PDE	9	7.6	3.1	20	2.95	52	46	0.25	7	307	-3.2	38	212	263	10	46	128	83	97	84	GS	
42	2003	1	22	2	6	48.9	18.86	-103.9	HRV	26	7.5	2	20	2.06	56	12	-0.02	4	108	-2.04	34	201	308	12	110	108	79	86	98	HRV	
43	2003	1	22	19	41	38.51	18.822	-104.374	PDE	19	5.8	5.6	17	5.64	66	51	-0.12	9	299	-5.52	22	206	278	24	67	123	68	100	96	GS	
44	2003	1	22	19	41	49.1	18.86	-104.54	HRV	20	5.9	8.4	17	7.91	68	37	0.99	2	303	-8.9	22	212	299	23	85	124	67	92	78	HRV	
45	2003	1	22	20	15	42.2	18.58	-104.16	HRV	15	5.5	1.8	17	1.68	59	36	0.29	7	294	-1.98	30	201	271	16	65	116	75	97	71	HRV	
46	2003	2	17	4	42	1.1	18.59	-104.94	HRV	18.1	5.3	1.1	17	0.95	70	79	0.26	14	304	-1.21	13	211	282	34	64	132	60	106	57	HRV	
47	2003	5	19	16	27	10.2	17.546	-105.473	PDE	11	6	1.4	18	1.44	10	259	-0.04	64	10	-1.4	24	165	304	66	-170	210	81	-24	94	GS	
48	2003	5	19	16	27	15.5	17.72	-105.57	HRV	15	6.1	1.6	18	1.57	6	85	0.04	81	314	-1.61	7	175	220	81	-1	110	89	-171	95	HRV	
49	2003	8	11	1	17	57.3	18.79	-106.49	HRV	15	5.7	3.4	17	3.04	37	52	0.68	29	297	-3.72	39	180	204	29	-2	296	89	-119	63	HRV	
50	2003	8	25	23	24	59.13																									

De la base de datos de HARVARD solo incluye sismos de magnitudes moderadas a altas, comenzando en magnitudes alrededor de 5. De esta se obtuvieron 45 sismos desde 1976 hasta el presente tal como se observa en la Tabla 2, datos que fueron adquiridos con los siguientes parámetros:

Global CMT Catalog

Search criteria:

Start date: 1976/1/1 End date: 2007/7/5

17 <=lat<= 20 -107 <=lon<= -104

0 <=depth<= 1000 -9999 <=time shift<= 9999

0 <=mb<= 10 0<=Ms<= 10 0<=Mw<= 10

0 <=tension plunge<= 90 0 <=null plunge<= 90

Results

Tabla 2. Muestra los datos para sismos en la zona de estudio descargados de la base de datos CMT de HARVARD.

#	ID	REGION	LAT	LONG	DEPTH (Km)	MAG	str1	dip1	rake1	str2	dip2	rake2	sc	iexp	mrr	mtt	mpp	mrt	mrrp	mtp
1	081882A	OFF COAST OF JALISCO	18.07	-105.7	15	5.4	281	90	180	11	90	0	1.53	24	-0.29	-0.4	0.7	0	0	-1.43
2	102582C	OFF COAST OF JALISCO MEX	18.43	-105.99	15	5.3	41	79	1	311	89	169	1.14	24	0.05	-1.13	1.08	-0.17	0.14	-0.17
3	110986B	OFF COAST JALISCO, MEX.	18.83	-106.73	15	5.4	280	90	180	10	90	0	1.37	24	-0.26	-0.35	0.61	0	0	-1.28
4	112787B	NR JALISCO, MEXICO COAST	18.51	-106.91	15	5.5	201	74	0	110	90	164	2.61	24	-0.31	-1.48	1.79	0.62	-0.4	-1.9
5	080388B	OFF JALISCO MEXICO COAST	18.8	-106.5	15	5.4	286	90	180	16	90	0	1.76	24	-0.36	-0.77	1.14	0	0	-1.48
6	041989C	OFF JALISCO MEXICO COAST	17.99	-105.47	15	5.7	127	85	176	217	86	5	5.16	24	-0.4	-4.72	5.12	0.03	-0.64	-1.44
7	042889A	OFF JALISCO MEXICO COAST	17.96	-105.22	15	5.6	291	73	-173	198	83	-17	3.23	24	-0.3	-1.79	2.1	0.61	0.75	-2.38
8	082989A	OFF JALISCO, MEXICO CST	17.88	-105.65	15	6.5	100	76	170	193	80	14	6.87	25	0.51	-2.85	2.34	0.79	-1.85	-6.02
9	120889B	NR JALISCO, MEXICO COAST	19.25	-105.14	15	5.5	13	22	162	120	83	69	1.89	24	0.52	0.31	-0.84	1.63	-0.62	0.3
10	010590D	OFF JALISCO MEXICO COAST	18.54	-106.83	15	5.9	284	90	-180	14	90	0	10.08	24	-0.23	-4.61	4.84	0	0	-8.9
11	010191A	OFF JALISCO MEXICO COAST	18.36	-106.01	15	6.2	275	90	-180	5	90	0	2.75	25	0.11	-0.49	0.38	0	0	-2.72
12	010191B	OFF JALISCO MEXICO COAST	18.37	-105.93	15	5.7	275	90	-180	5	90	0	5	24	-0.44	-0.71	1.15	0	0	-4.91
13	111191F	OFF JALISCO MEXICO COAST	18.08	-105.89	15	5.9	280	90	-180	10	90	0	9.27	24	-0.36	-2.95	3.31	0	0	-8.73
14	121792A	OFF JALISCO MEXICO COAST	18.05	-105.45	15	5.4	281	90	-180	11	90	0	1.47	24	0.15	-0.61	0.46	0	0	-1.37
15	100695A	NEAR COAST OF JALISCO, M	19.15	-104.25	17	5.8	285	25	70	127	66	99	5.83	24	4.03	-3.53	-0.5	2.92	-2.57	2.12
16	100995C	NEAR COAST OF JALISCO, M	19.34	-104.8	15	8	302	9	92	120	81	90	11.47	27	3.62	-2.53	-1.09	9.44	-5.49	1.4
17	101295C	NEAR COAST OF JALISCO, M	18.81	-104.07	20	5.9	286	23	70	128	69	98	10.47	24	6.25	-5.7	-0.56	5.88	-4.89	4.14
18	101895N	NEAR COAST OF JALISCO, M	19.06	-105.22	16.8	5.4	273	25	49	137	71	107	1.86	24	1.01	-1.01	-0.01	0.89	-1.1	0.68
19	112195B	OFF COAST OF JALISCO, ME	18.93	-105.67	32	5.3	256	83	175	347	85	7	1.27	24	0.09	0.52	-0.61	-0.13	0.13	-1.12
20	121195C	Off Coast Of Jalisco, Me	18.84	-105.75	15	6.3	83	74	171	175	82	17	3.4	25	-0.04	0.68	-0.64	0.7	-0.95	-3.13
21	121195F	Off Coast Of Jalisco, Me	18.86	-105.74	15	5.7	77	75	-171	345	81	-15	5.23	24	-0.06	2.33	-2.27	-0.53	-1.62	-4.4
22	121195G	Off Coast Of Jalisco, Me	18.71	-105.68	15	6.1	83	77	-176	352	86	-13	1.52	25	0.02	0.36	-0.38	-0.08	-0.35	-1.43
23	050996B	NEAR COAST OF JALISCO, M	18.83	-104.18	15	5.3	281	37	60	137	58	111	9.85	23	7.52	-6.77	-0.75	1.95	-3.65	5.57
24	040897D	OFF COAST OF JALISCO, ME	18.99	-106.73	15	5.5	96	73	-177	5	87	-17	2.42	24	-0.75	-0.14	0.89	0.13	-0.64	-2.28
25	042399A	OFF COAST OF MICHOACAN,	18.09	-105.14	15	5.3	312	52	171	48	83	39	11.68	23	0.75	-9.16	8.41	3.33	7.25	0.82
26	030700A	NEAR COAST OF JALISCO, M	19.46	-104.08	15	5.3	215	37	-66	6	57	-107	1.19	24	-1.14	0.25	0.88	0.22	-0.5	0.31
27	120900B	OFF COAST OF JALISCO, ME	18.17	-105.48	15	5.3	288	90	-180	18	90	0	10.51	23	1.93	-7.2	5.28	0	0	-8.46
28	042901B	NEAR COAST OF JALISCO, M	18.71	-104.74	15	6.1	292	18	77	126	72	94	1.94	25	1.15	-0.88	-0.28	1.25	-0.96	0.47
29	050801A	NEAR COAST OF JALISCO, M	18.72	-104.15	34.2	5.5	284	23	69	126	68	99	2.26	24	1.36	-1.34	-0.02	1.28	-0.98	0.89
30	052001A	NEAR COAST OF JALISCO, M	18.62	-104.57	15	6.3	290	17	73	127	74	95	3.64	25	1.91	-1.5	-0.4	2.39	-1.93	0.87
31	110502D	NEAR COAST OF JALISCO, M	19.21	-104.75	15	5.2	277	26	-131	141	71	-72	8.97	23	-5.48	4.73	0.74	-3.41	5.89	-2.82
32	112302B	OFF COAST OF JALISCO, ME	18.95	-106.65	15	5.4	283	79	-176	192	86	-12	1.51	24	0.02	-0.64	0.62	0.18	0.27	-1.33
33	112302C	OFF COAST OF JALISCO, ME	18.73	-106.91	15	5.4	199	73	-9	291	81	-163	13.38	23	1.62	-8.89	7.27	5.38	1.52	-9.44
34	012203D	NEAR COAST OF JALISCO, M	18.86	-104.54	20	5.9	299	23	85	124	67	92	8.404	24	5.47	-4.41	-1.06	4.88	-3.34	3.34
35	012203E	NEAR COAST OF JALISCO, M	18.58	-104.16	15	5.4	271	16	65	116	75	97	1.83	24	0.75	-0.95	0.21	1.42	-0.7	0.39
36	021703A	NEAR COAST OF JALISCO, M	18.59	-104.94	18.1	5.3	282	34	64	132	60	106	1.079	24	0.79	-0.76	-0.03	0.33	-0.38	0.6
37	051903D	OFF COAST OF JALISCO, ME	17.72	-105.57	15	6.1	220	81	-1	310	89	-171	1.587	25	0.03	-1.56	1.53	0.2	-0.13	-0.28
38	081103D	OFF COAST OF JALISCO, ME	18.79	-106.49	15	5.6	204	29	-2	296	89	-119	3.377	24	-0.22	-1.38	1.6	2.86	-0.89	-0.73
39	050204A	OFF COAST OF JALISCO, ME	18.02	-106.07	12	5.3	1	74	-3	91	87	-164	1.136	24	-0.36	0.16	0.2	-0.28	0.11	-1.1
40	050204D	OFF COAST OF JALISCO, ME	18.09	-106.08	12	5.4	271	69	-178	181	88	-21	1.452	24	-0.56	0.17	0.39	-0.3	0.5	-1.36
41	200502280105A	NEAR COAST OF JALISCO, M	18.92	-104.45	18	5.6	315	19	110	114	72	83	3.667	24	2.04	-1.51	-0.54	2.74	-1.11	1.17
42	200510240123A	OFF COAST OF JALISCO, ME	17.98	-106.03	16.9	5.1	276	63	167	12	78	28	5.115	23	1.07	-1.9	0.82	-0.36	2.26	-4.27
43	200607311825A	NEAR COAST OF MICHOACAN,	18.62	-104.08	24.1	5.3	302	28	96	115	62	87	1.291	24	0.99	-0.85	-0.14	0.68	-0.29	0.53
44	200611190659A	NEAR COAST OF JALISCO, M	18.65	-104.17	21.2	5.5	305	23	82	134	67	93	2.639	24	1.77	-1.08	-0.69	1.31	-1.32	1.07
45	200702152329A	OFF COAST OF JALISCO, ME	18.59	-106.57	21.6	4.9	280	72	170	13	81	18	2.848	23	0.08	-1.12	1.04	-0.34	1.01	-2.42

Ya que en ambas bases de datos se tienen eventos repetidos (Figura 79), fue necesario crear una base de datos que tuviera la totalidad de los sismos, pero sin duplicados y solo con las variables que definen los mecanismos focales, tal como se observa en la Tabla 3.

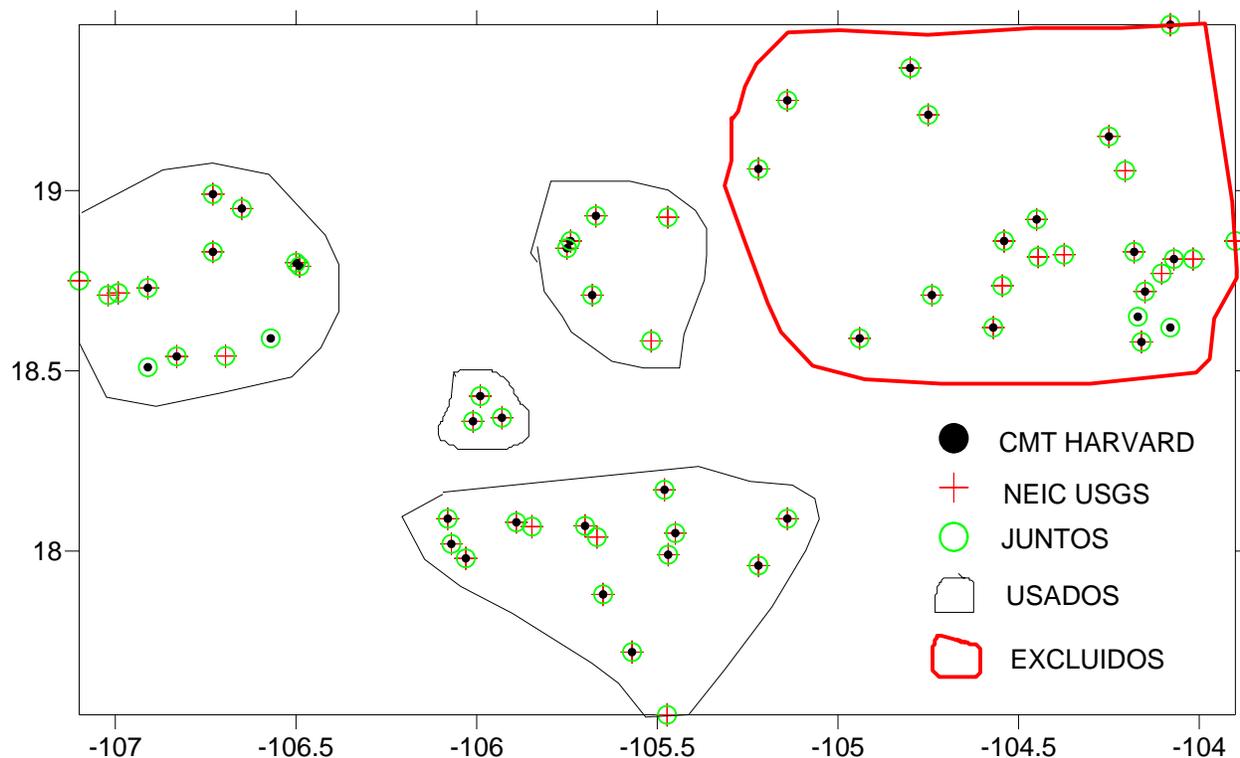


Figura 79. Mapa de la localización de los sismos. Los datos de cada una de las bases de datos y los datos que al final fueron utilizados.

Tabla 3. Base de datos integrada sin duplicados a partir de los datos de datos CMT de HARVARD y NEIC del USGS.

#ID	NODAL PLANES			COORD		DEPTH	MAG
	STK	DP	SLIP	LAT	LONG	km	Mw
1	281	90	180	18.07	-105.7	15	5.4
2	41	79	1	18.43	-105.99	15	5.3
3	280	90	180	18.83	-106.73	15	5.4
4	201	74	0	18.51	-106.91	15	5.5
5	286	90	180	18.8	-106.5	15	5.5
6	127	85	176	17.99	-105.47	15	5.8
7	291	73	-173	17.96	-105.22	15	5.6
8	193	78	5	18.039	-105.667	75	6.4
9	100	76	170	17.88	-105.65	15	6.5
10	13	22	162	19.25	-105.14	15	5.5
11	284	90	-180	18.54	-106.83	15	6
12	203	83	7	18.068	-105.847	-----	-----
13	275	90	-180	18.36	-106.01	15	6.3
14	275	90	-180	18.37	-105.93	15	5.8
15	280	90	-180	18.08	-105.89	15	5.9
16	281	90	-180	18.05	-105.45	15	5.4
17	285	25	70	19.15	-104.25	17	5.8
18	242	7	43	19.055	-104.205	4	7.9
19	302	9	92	19.34	-104.8	15	8
20	311	20	98	18.81	-104.017	21	5.8
21	286	23	70	18.81	-104.07	20	6
22	273	25	49	19.06	-105.22	16.8	5.5
23	256	83	175	18.93	-105.67	32	5.4
24	92	77	171	18.926	-105.471	13	6.3
25	83	74	171	18.84	-105.75	15	6.3
26	77	75	-171	18.86	-105.74	15	5.8
27	97	73	176	18.583	-105.517	11	6.1
28	83	77	-176	18.71	-105.68	15	6.1
29	281	37	60	18.83	-104.18	15	5.3
30	96	73	-177	18.99	-106.73	15	5.6
31	312	52	171	18.09	-105.14	15	5.4
32	215	37	-66	19.46	-104.08	15	5.4
33	288	90	-180	18.17	-105.48	15	5.3
34	52	62	158	18.736	-104.545	14	5.9
35	292	18	77	18.71	-104.74	15	6.2
36	284	23	69	18.72	-104.15	34.2	5.5
37	235	28	34	18.816	-104.446	21	6.2
38	290	17	73	18.62	-104.57	15	6.3
39	277	26	-131	19.21	-104.75	15	5.3
40	283	79	-176	18.95	-106.65	15	5.4
41	199	73	-9	18.73	-106.91	15	5.4
42	263	10	46	18.77	-104.104	9	7.6
43	308	12	110	18.86	-103.9	26	7.5
44	278	24	67	18.822	-104.374	19	5.8
45	299	23	85	18.86	-104.54	20	5.9
46	271	16	65	18.58	-104.16	15	5.5
47	282	34	64	18.59	-104.94	18.1	5.3
48	304	66	-170	17.546	-105.473	11	6
49	220	81	-1	17.72	-105.57	15	6.1
50	204	29	-2	18.79	-106.49	15	5.7
51	124	74	-177	18.541	-106.695	14	5.8
52	31	83	-3	18.71	-107.02	15	5.7
53	1	74	-3	18.02	-106.07	12	5.3
54	271	69	-178	18.09	-106.08	12	5.4
55	315	19	110	18.92	-104.45	18	5.7
56	276	63	167	17.98	-106.03	16.9	5.1
57	112	79	171	18.716	-106.992	13	5.9
58	18	81	4	18.75	-107.1	25.8	6
59	302	28	96	18.62	-104.08	24.1	5.3
60	305	23	82	18.65	-104.17	21.2	5.5
61	280	72	170	18.59	-106.57	21.6	4.9

Ahora bien como el proceso de subducción no hace parte directa de este estudio, los mecanismos focales relacionados con este proceso fueron excluidos, quedando tan solo 34 sismos, tal como se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4. Base de datos integrada, con los sismos empleados en este estudio.

#ID	NODAL PLANES				COORD		DEPTH	MAG
	STK 1	STK 2	DP	SLIP	LAT	LONG	km	Mw
1	281	191	90	180	18.07	-105.7	15	5.4
2	41	131	79	1	18.43	-105.99	15	5.3
3	280	190	90	180	18.83	-106.73	15	5.4
4	201	291	74	0	18.51	-106.91	15	5.5
5	286	196	90	180	18.8	-106.5	15	5.5
6	127	217	85	176	17.99	-105.47	15	5.8
7	291	201	73	-173	17.96	-105.22	15	5.6
8	193	283	78	5	18.039	-105.667	75	6.4
9	100	190	76	170	17.88	-105.65	15	6.5
10	284	194	90	-180	18.54	-106.83	15	6
11	203	293	83	7	18.068	-105.847	-----	-----
12	275	185	90	-180	18.36	-106.01	15	6.3
13	275	185	90	-180	18.37	-105.93	15	5.8
14	280	190	90	-180	18.08	-105.89	15	5.9
15	281	191	90	-180	18.05	-105.45	15	5.4
16	256	346	83	175	18.93	-105.67	32	5.4
17	92	182	77	171	18.926	-105.471	13	6.3
18	83	173	74	171	18.84	-105.75	15	6.3
19	77	167	75	-171	18.86	-105.74	15	5.8
20	97	187	73	176	18.583	-105.517	11	6.1
21	83	173	77	-176	18.71	-105.68	15	6.1
22	96	186	73	-177	18.99	-106.73	15	5.6
23	312	222	52	171	18.09	-105.14	15	5.4
24	288	198	90	-180	18.17	-105.48	15	5.3
25	283	193	79	-176	18.95	-106.65	15	5.4
26	199	289	73	-9	18.73	-106.91	15	5.4
27	304	214	66	-170	17.546	-105.473	11	6
28	220	310	81	-1	17.72	-105.57	15	6.1
29	204	294	29	-2	18.79	-106.49	15	5.7
30	124	214	74	-177	18.541	-106.695	14	5.8
31	1	91	74	-3	18.02	-106.07	12	5.3
32	271	181	69	-178	18.09	-106.08	12	5.4
33	276	186	63	167	17.98	-106.03	16.9	5.1
34	280	190	72	170	18.59	-106.57	21.6	4.9

ANEXO 3. DRAGADOS, MUESTREO Y FECHAMIENTO

Los muestreos en los cruceros MARTIC04 Y MARTIC05 se realizaron mediante unas dragas de arrastre para rocas (Figura 80). Esta es una manera de tomar muestras del fondo marino, antigua pero adecuada y económica, con métodos y equipos que han cambiado poco, desde sus inicios.

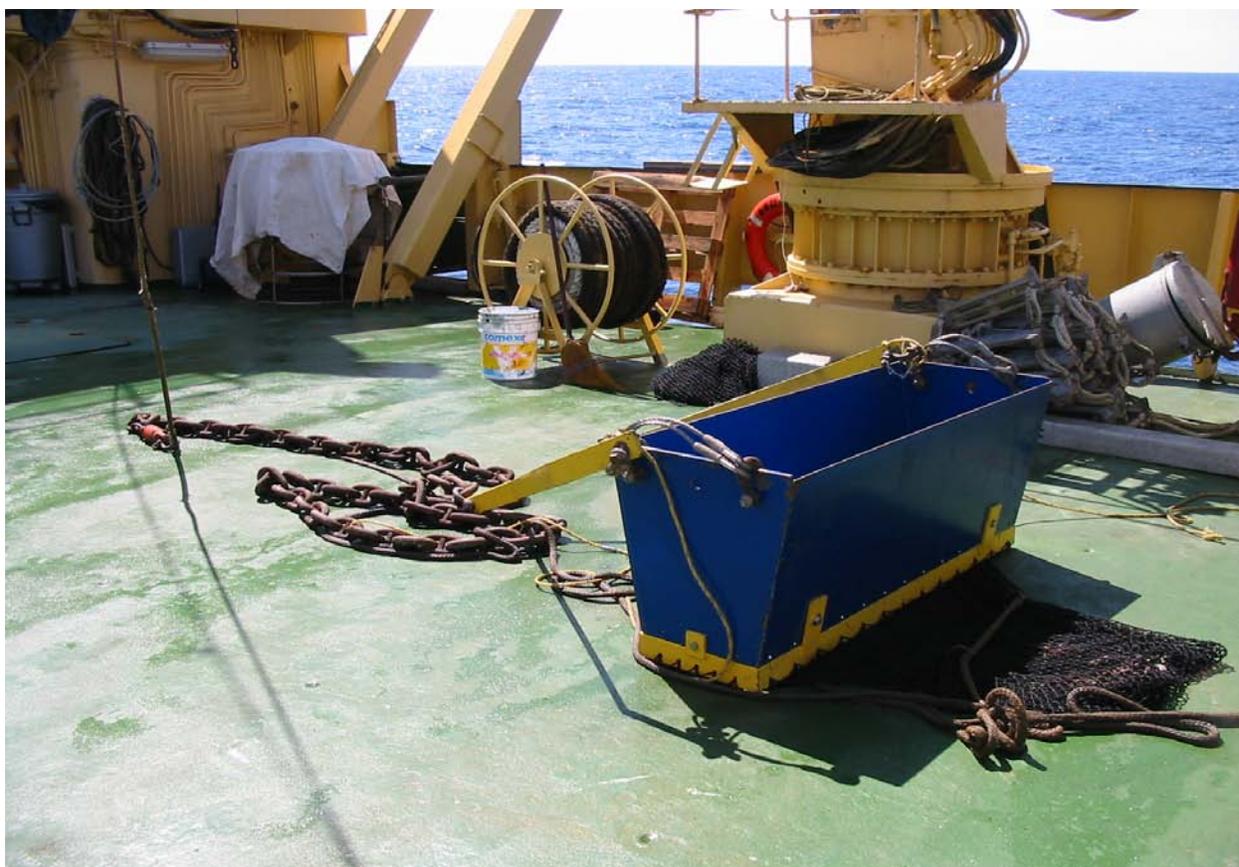


Figura 80. Draga de arrastre para rocas usada durante el crucero MARTIC04.

Con estas dragas se realizaron en total 13 intentos de muestreo en ambos cruceros, 8 en MARTIC04 y 5 en MARTIC05. Para que la draga toque fondo, en la zona donde se arrastra a más de 2000 metros de profundidad, la longitud del cabo y las condiciones de la velocidad del barco deben ser las adecuadas. Solo se lograron obtener algunas muestras de roca en el sitio D-5 de MARTIC04, en el resto de sitios no se logró obtener

ninguna muestra de roca. Como el B/O EL PUMA no posee sistema de posicionamiento dinámico, la velocidad del barco debe ser lo más lenta posible pero mayor que la velocidad de las corrientes (entre los 2 y los 4 nudos), para poder conservar el rumbo y realizar el dragado en la zona deseada. Además para que el dragado sea exitoso en la recolección de muestras de roca, el piso marino debe ser rugoso y estar libre o con muy poca cobertura de sedimentos.

Al observar la localización de las muestras, en conjunto con los mapas batimétrico y magnetométrico (Figuras 37 y 40, en el cuerpo del trabajo) se observa que coincide con profundidades en las cuales es extremadamente difícil obtener muestras de roca y al mismo tiempo se denota la intención de obtener resultados que permitieran definir con mayor certidumbre las edades de la corteza oceánica donde se realizaron los dragados.

El sitio D-5, donde se obtuvieron muestras en MARTIC04, es un arrastre que está definido por las siguientes coordenadas: inicio (18.523N, 105.772W) y fin (18.502N, 105.747W). El arrastre se realizó en dirección NW-SE, el sitio de muestreo se encuentra alrededor de unos 2700 m de profundidad (Figura 81).

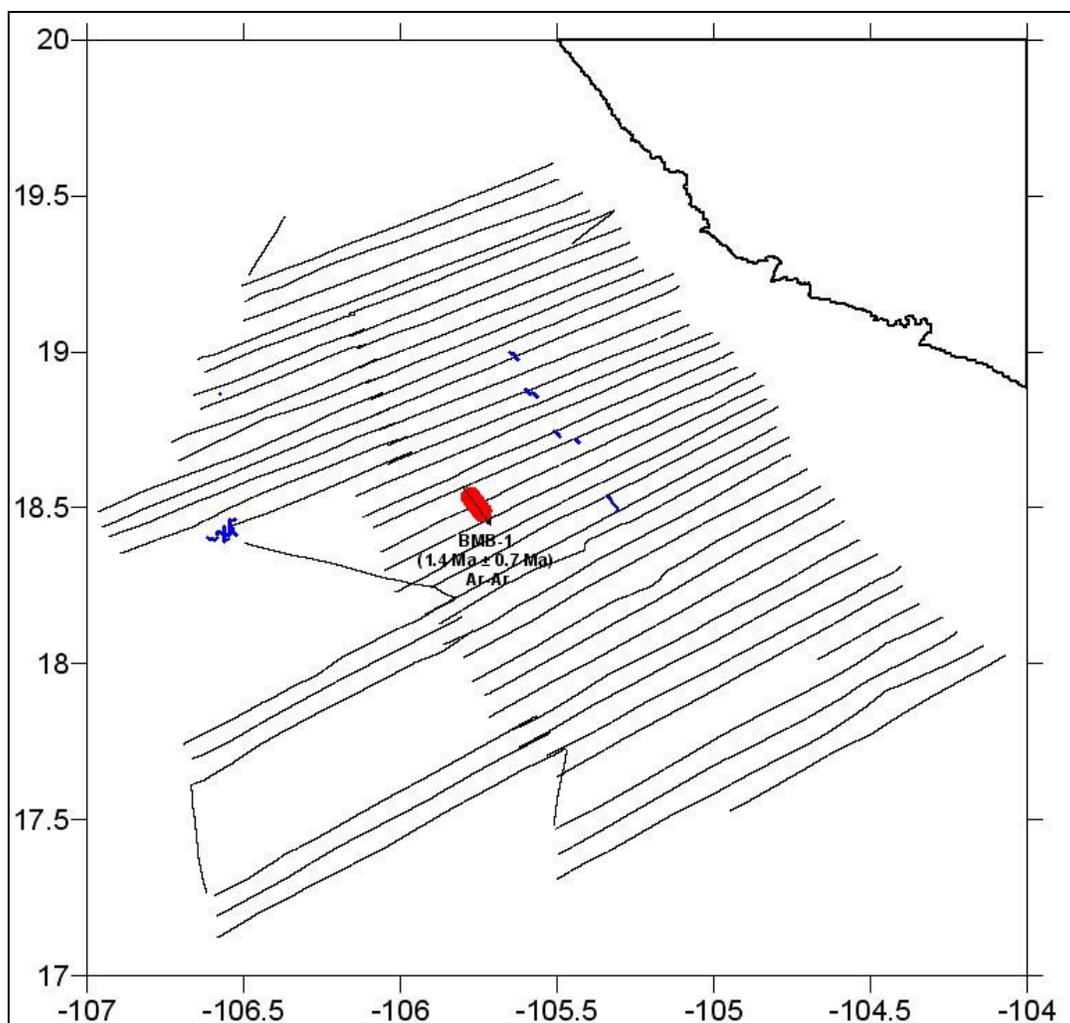


Figura 81. Zonas en las que se realizaron los intentos (en azul) de dragados para los cruceros MARTIC04 y MARTIC05, más el resultado del fechamiento de la muestra en el sitio (en rojo) donde se logró sacar material de fondo.

De este sitio de dragado se obtuvieron 15 muestras de rocas basálticas de un tamaño mayor a 1 cm, la muestra de mayor tamaño (aproximadamente 10 cm de diámetro), fue la que se fechó por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en el Laboratorio de Geocronología del CICESE, del cual es responsable la Dra. Margarita López Martínez.

La muestra se analizó en dos sectores (borde exterior y núcleo), que poseen una composición muy similar, pero con un grado de alteración diferencial. Los fechamientos definitivos para estos dos sectores son $1.3 \text{ Ma} \pm 0.4 \text{ Ma}$ para el borde exterior y $1.4 \text{ Ma} \pm 0.7 \text{ Ma}$ para el núcleo [Dr. Schaaf, comunicación personal, 2007].