

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Institut de Ciències de la Terra *Jaume Almera*

Departament de Geofísica

Programa de Doctorado de *Tectònica y Geofísica*, bienio 96-98

**EVOLUCIÓN TECTÓNICA DEL MARGEN CONTINENTAL OESTE
DE MÉXICO: FOSA MESOAMERICANA Y GOLFO DE CALIFORNIA
(CORTES-P96)**

Tesis

Presentada por **Rafael Bartolomé de la Peña** ante el *Departament de Geodinàmica i Geofísica* de la *Universitat de Barcelona* para optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas.

Director:

Dr. Juan José Dañobeitia

Tutor: **Dr. Josep Anton Muñoz**

Barcelona, Marzo de 2002

A mi padre

Ni el mejor ciclista te ganaría escalando tu puerto.

...En alta mar el aire era fresco, las heridas cicatrizaban antes, y el silencio se tornaba lo bastante intenso como para hacer soportables las preguntas sin respuesta y justificar los propios silencios ...

Javier Pérez-Reverte, La Carta esférica.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Dr. Juanjo Dañobeitia toda su colaboración durante estos años, tanto en lo humano como en lo científico. En mi opinión, “esto de la ciencia” tiene casi más que ver con lo humano que con lo científico: lo primero perdura, lo segundo tiene fecha de caducidad. Desde luego, por dinero uno no está en esto. Ni por la Seguridad Social, ni por el paro.

Ante todo, agradecerle la confianza y la libertad depositada en mi. Siendo un “mocoso” de 24 años me subió en un barco por primera vez, nada menos que en Lima. Con 25 me hizo “jefe científico” en un barco americano (la cara que pusieron los *guiris* cuando supieron que no era ni doctor...). De manera no muy ortodoxa (las leyes se respetan, hasta que hay que saltárselas, no?) pude pasar unas Navidades en la Antártida. Incluso hice de “guardaespaldas” en las reuniones de Oporto. La libertad en mis caóticos horarios, no tiene precio. Dos palabras resumen mi agradecimiento: confianza y apoyo.

Agradezco a toda la gente con la que he compartido infatigablemente los largos turnos y me han beneficiado de sus pericias profesionales y experiencia en la mar.

A la Dra. Eulalia Gràcia por su amistad, optimismo y velocidad de corrección de algunos capítulos de la tesis.

Al Dr. Ramon Carbonell, que es el que sabe de sismica de reflexión. Además, con él he descubierto lo que es un buen jamón pata negra en Cáceres.

Al Dr. Josep Gallart, que me llevó al País Vasco.

Al Dr. Jordi Díaz, que ha sido mi system-manager no oficial, Dr. JP Canales y a Mari Gil cuyos programas han sido vitales para este trabajo. Y al resto de Investigadores y personal del Instituto, administración y mantenimiento por su ayuda. Dos menciones especiales: Amelia (la alegría de la casa: el *soplar* se me va a acabar) y Lola Clavera.

Al Dr. Diego Córdoba, que fue el que nos convenció para ir a México, al Dr. Francisco Núñez quien nos ayudó con la logística de Tierra, al Dr. Luis Delgado quien nos ayudó en la estrategia del Golfo de California, y al Dr. François Michaud, que aparte de proporcionarnos algunos datos batimétricos, nos ayudó con la geodinámica de la zona.

A Dr. Gómez, la interpretación es tuya.

Y ahora venís vosotros, compañeros y amigos, que ya os estabais buscando: los becarios y ex-becarios, los míos. Mario-*Björk*, Manu *Mourouver*, David y *Vibra*, el gran *Dr. Gil*, Valen, Félix (una de las mentes más preclaras), Isaac *Melenillas*, Charlie *Beckembauer*, Ignacio, Ivone, Dani, la legión francesa extranjera, Jaime. Con vosotros he jugado en la mejor liga de fútbol y he comido en el mejor restaurante. No lo olvidéis, hay que hacerlo con mucho amor. Y a todos los demás, Joana, Mariajo, Silvia, JP, Pepe, Itzik, Craig.

En estos años he conocido a unos seres especiales. No hay nadie que se enfrente a la adversidad con mayor ímpetu que un marino trabajando en la cubierta de un barco durante un temporal. Y por un módico precio. Agradezco a los UGBOS dejarme ser uno de ellos aunque fuera por poco tiempo: Pablo (menuda boda!!!), Toni y Javi (romero y tomillo), Urbano (de mayor quiero ser como tú), Raqueles, Abel, Marcel.lí (la sabiduría que da la experiencia), Pedro Jornet (qué noche la de aquel día), Miquel Pancorbo, y demás gente que ya no está.

A mis amigos de siempre Dani, Andreu, Ramon, Eguz, Onintze. Esté donde esté, siempre voy con vosotros.

A Carles, fisioterapeuta eminente y magnánimo. A Gil (mientras no haya que pagar, me lo creo todo). A Cesc, mi compañero de escalada.

A mi familia por su apoyo incondicional y su amor: mi madre, mi hermana, Oscar y mi pequeño angelito Miguel. Te lo dedico a ti, padre, no hay nadie más fuerte que tú.

A lo mejor que me ha dado esta tesis, conocer a mi Raquel. No hay nada más bello que tu amor.

... la mujer es el único ser que no puede definirse con dos oraciones consecutivas...

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CORTES, subvencionado por la CICYT (ANT94-0182-C03-01/02), y parcialmente por los proyectos MAIAE subvencionado por CYTMAR (MAR98-0962), y BIGSETS subvencionado por la UE (ENV4-CT97-0547).

RESUMEN

El contexto geodinámico y tectónico del margen oeste de México se engloba dentro del régimen general de subducción de la placa oceánica del Pacífico bajo el continente Norteamericano (margen activo).

El oeste mexicano comprende en el norte un margen transformante formado por un conjunto de zonas de expansión. Este enjambre de fallas de salto en dirección supone el límite de las placas Pacífico-Norteamericana entre los 32° N y los 23° N. Entre 23° N y 19° N y con una velocidad relativa de convergencia de 2.0 cm/año (Pardo et al., 1995) se sitúa la dorsal Pacífico-Rivera (*Pacific Rivera Rise*, PRR), que confina el límite entre las placas de Rivera y Pacífico. Entorno a los 21° N se encuentra el extremo septentrional de la fosa mesoamericana (MAT), donde se alcanzan profundidades de 6000 m y la zona de colisión y subducción de la microplaca de Rivera y la placa de Cocos respectivamente.

En la campaña CORTES-P96 se adquirieron nuevos datos de sísmica multicanal (MCS) y de gran ángulo, gravimetría, batimetría, sonografías y magnetismo que incluyen las zonas de contacto entre el Bloque de Jalisco y la zona de fractura Rivera, hasta la terminación norte de la zona de fractura de Tamayo en el extremo sur de Baja California.

La integración de estos datos geofísicos nos ha permitido deducir la estructura litosférica, mejorando la comprensión de la dinámica de la subducción en la MAT y definiendo las características principales de la corteza. Además, se ha condicionado un modelo geodinámico que ajusta los valores gravimétricos de la zona y la localización temporal de algunos eventos gracias al estudio de las anomalías magnéticas de expansión oceánica.

El análisis del primer segundo de los perfiles de MCS ha permitido obtener imágenes del BSR (*Bottom Simulating Reflector*), un reflector anómalo que está asociado a un cambio de polaridad en la señal sísmica originado por la presencia de hidratos de gas (de composición mayoritariamente de metano). Los datos MCS nos han permitido cartografiar la zona que contiene BSR. Además, el análisis cuantitativo de la señal sísmica ha permitido la obtención del coeficiente de reflexión, la estructura de la velocidad y el gradiente térmico.

El estudio conjunto de los datos MCS y de gran ángulo nos proporciona la caracterización de la estructura crustal profunda. Se ha identificado un prisma de

acreción de 20 km de extensión con una velocidad para las ondas P de 3.5 km/s. La subducción se observa alrededor de los 6s (dtr), en todos los perfiles multicanal. La placa que subduce muestra un ángulo variable de sur a norte, mostrando promedio de 9°. La placa oceánica de Rivera tiene un grosor máximo de 9 km. La velocidad del manto superior bajo la placa en subducción es de 7.8 km/s.

Al noroeste de la placa de Rivera, hacia las islas Tres Marías, la interpretación conjunta de datos incluyendo sonografías, anomalías gravimétricas y distribución de velocidades parece indicar que el límite continental-oceánico está más cerca de Baja California de lo que previamente se pensaba, mostrando una asimetría clara respecto del EPR y mostrando una extensa zona de transición, que se inicia al sureste del MMR y continua hacia el oeste del margen de México. Los datos magnéticos nos permiten controlar la edad del basamento oceánico. La anomalía magnética más antigua detectada ha sido la 2A (3.5 Ma). El grosor medio de la corteza oceánica alrededor del EPR es de 6 km, con un rápido crecimiento hacia el extremo sur de Baja California. Hacia el sureste el engrosamiento es más gradual alcanzando grosores entre 8-10 km bajo el MMR, y 15 km en el final del margen.

ABSTRACT

During the CORTES-P96 project a new multichannel (MCS) and wide-angle seismic, potential fields (gravity and magnetics), bathymetry, and backscatter data were achieved along the Jalisco Block and the RFz (Pto. Vallarta) until the northern termination of the Tamayo Fracture zone in the southern tip of Baja California.

The integration of bathymetric, MCS and wide-angle seismic, together with gravity and seismicity data allows us to determine the west Mexican lithospheric structure in a pseudo 3D image and the 2D equivalents, improving the geodynamic comprehension of the subducting plates in the MAT, and defining the main crustal characteristics of the collision zone.

The analysis of 1s (twtt) in the MCS profiles allows us to clearly image the BSR. From the seismic signal analysis we work out the reflection coefficient, the velocity profile and the thermal gradient.

MCS and wide-angle data characterize the deep crustal structure. We clearly image an accretionary prism of 20 km of extension with P-wave velocity of around 3.5 km/s. The overriding oceanic plate subducts with a variable angle from south to north, showing a mean deep angle of $9^{\circ} \pm 2^{\circ}$. This oceanic crust (Rivera plate) has a mean thickness of 4 km, and is located beneath a low velocity layer of 3.3-3.9 km/s, which seems to be a typical feature of the MAT. In most of the MCS profiles the subduction plane is observed around 6 s (twtt), and a strong reflection which we interpret as a Moho discontinuity is detected at 8s.

Northwest of Rivera Plate, close to Tres Marias Islands, a joint interpretation of the various dataset indicate that the continental-oceanic boundary is closer to the Baja California than previously was thought, showing an EPR asymmetry that indicates a transition zone starting southeast of Maria Magdalena Rise and extends to the west margin of Mexico. The magnetic data have been used to control the age of the oceanic basement. The average thickness of the oceanic crust around the EPR is 6 km. Towards the southeast the thickness gradually reaches values between 8-10 km beneath the MMR, and 15 km at the end of the margin.

INDICE

Resumen	i
Abstract	v
Indice	ix
Indice de Figuras	xv
Indice de Tablas	xxvii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos y estructura del trabajo	4
2. SISMICA DE REFLEXIÓN	9
2.1 Introducción	11
2.2 Procesado de los datos	13
2.1.1 Introducción al procesado sísmico	13
2.3 Pasos del procesado	19
2.3.1 Lectura de los datos	20
2.2.2 Análisis frecuencial	20
2.2.3 Edición de trazas	27
2.2.4 Corrección de la atenuación energética	28
2.2.5 Introducción de la geometría	29
2.2.6 Correcciones dinámicas. Análisis de velocidad y Normal Moveout (NMO)	30
1. Análisis de velocidad mediante semblanza	35
2. Análisis con paneles de stack a velocidad constantes	38
2.2.7 Deconvolución	40
2.2.8 Migración	45

3. CONTEXTO GEODINÁMICO Y TECTÓNICO	53
3.1 Introducción	55
3.2 Marco geodinámico y geológico	58
3.3 Evolución tectónica	62
3.3.1 Aspectos Generales	74
3.3.2 Evolución tectónica reciente: Neógeno y Cuaternario	77
3.4 El Bloque de Jalisco	83
4. ESTUDIO DEL BSR	89
4.1 Introducción	91
4.2 Trascendencia del estudio del BSR a nivel mundial	92
4.3 Estudio del BSR	95
4.4 Evidencias geofísicas para la detección de gases hidratados	99
4.5 Caracterización de los gases hidratados por geoquímica	103
4.6 Fuentes de gas y formación de gases hidratados	104
4.7 Implicaciones económicas del BSR	105
4.8 Evidencias sísmicas de gases hidratados en los taludes y las plataformas continentales en México.	106
4.8.1 Propiedades de la reflexión anómala. Estudio sísmico del BSR.	111
4.8.2 Cambio de polaridad, coeficiente de reflexión y amplitudes del BSR.	112
4.8.2.1 Definición matemática del coeficiente de reflexión	115
4.8.2.2 Método de cálculo del coeficiente de reflexión	118
4.8.2.3 Cálculo de las pérdidas de energía por absorción y dispersión	120
4.8.2.4 Cálculo del coeficiente de reflexión del fondo oceánico	123
4.8.2.5 Cálculo del coeficiente de reflexión del BSR	125

4.9 Gradiente térmico y condiciones de estabilidad del BSR	131
4.9.1 Cálculo de la presión y la temperatura en el BSR:	
estabilidad del gas hidratado	131
4.10 Descripción de los datos sísmicos que contienen BSR	133
4.10.1 Distribución del BSR en el margen oeste mexicano	134
y origen del hidrato	
4.10.2 Estudio de la reflectividad en los sedimentos	136
4.10.3 Destrucción del BSR por derrumbamientos y	
expulsión vertical de fluidos	137
5. BATIMETRÍA	145
5.1 Datos utilizados	147
6. GRAVIMETRÍA	157
6.1 Introducción	159
6.2 Metodología	159
6.3 Datos gravimétricos de satélite	161
6.4 Densidades utilizadas en los perfiles	162
6.5 Modelización gravimétrica	163
6.6 Interpretación de los modelos	168
7. SISMICIDAD	171
7.1 Introducción	173
7.2 Datos sismológicos	176
7.3 Interpretación de los datos	179
7.4 Resultados	181

8. ESTRUCTURA CORTICAL DEL MARGEN OESTE MEXICANO	
(BLOQUE DE JALISCO)	183
8. Introducción	185
8.1 Registros obtenidos tras el procesado	185
8.2 Estructura superficial	217
8.2.1 Estructura superficial: Dominio oceánico al oeste de la MAT	217
8.2.2 Estructura superficial: Dominio oceánico al este de la MAT	218
8.3 Estructura profunda	239
9. TRANSECTA ENTRE EL BLOQUE DE JALISCO Y	
PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA	243
9.1 Introducción	245
9.2 Anomalías Magnéticas	248
9.3 Sísmica	250
9.3.1 Sísmica de reflexión. Descripción del perfil	250
9.3.2 Sísmica de refracción. Descripción del perfil	257
9.3.3 Modelo de corteza de la Islas Tres Marías, sector Oriental del EPR	263
9.3.4 Modelo de corteza de la Dorsal del Pacífico Oriental (EPR) y	
Margen de la Península de Baja California	265
9.3.5 Análisis y conclusiones del modelo de corteza	
Puerto Vallarta-Los Cabos	267
10. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	271
10.1 Introducción	273
10.2 Procesado de los datos geofísicos	273
10.3 El Bottom Simulating Reflector (BSR)	275
10.4 El Margen Oeste Mexicano en la Placa de Rivera	275

10.5 Dominio cortical entre el Bloque de Jalisco y la Península de Baja California	276
11. ANEXO I	279
11.1 Adquisición de datos	281
11.2 Obtención de ficheros con todos los observables geofísicos	283
11.2.1 Ficheros de navegación	283
11.2.2 Ficheros de gravimetría y magnetismo	285
11.3 Integración de los datos de navegación con los campos potenciales	286
11.4 Cálculo de anomalías	286
REFERENCIAS	289

INDICE DE FIGURAS

Página

CAPÍTULO 1

Figura 1.1: Campaña geofísica CORTES-P96 a lo largo del margen oeste mexicano y Golfo de California. **5**

CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Geometría del CDP: el mismo punto M ó CDP está muestreado por distintas parejas de tiros (S_i) y receptores (R_i) **17**

Figura 2.2 Efectos geométricos en algunas reflexiones. A la izquierda estructuras geológicas; a la derecha como quedarían los estratos en las secciones sísmicas en doble tiempo. **18**

Figura 2.3: Ilustración del efecto del aliasing temporal. En la figura superior la señal original en trazo continuo puede reproducirse con el muestreo (Δt) mediante asteriscos. En la figura inferior, la discretización da una onda en trazo discontinuo que no reproduce la señal original (en trazo continuo), de más alta frecuencia. **24**

Figura 2.4 : Arriba, el espectro de amplitudes de un filtro pasobanda ideal. Abajo, la respuesta equivalente en el dominio temporal. Notar las oscilaciones (ringing) a cada lado del pico central causadas por las pendientes fuertes en el espectro de amplitudes. **25**

Figura 2.5: Arriba, el espectro de amplitudes de un filtro pasobanda típico. Abajo, la respuesta equivalente en el dominio temporal. Notar la disminución de las oscilaciones fuera del pico central como resultado de unas pendientes más suaves. **26**

Figura 2.6 a) Shot-gather número 887 correspondiente al perfil marino 201 antes (a) y después (b) del remuestreo, la edición y el filtrado paso banda. **27**

Figura 2.6 b) Detalle de los tres primeros segundos bajo el fondo oceánico del tiro 887 del perfil 201 antes y después del remuestreo, la edición y el filtrado pasobanda. En la figura de la derecha se observa la mejora de la calidad de los datos.

Figura 2.7: a) Ejemplo de shot gather o tiro (S_i) recogido por los diferentes canales del streamer (R_i). b) Esquema de un CDP gather, o todos los tiros (S_i) que se reflejan en el mismo punto M y que son captados cada uno por el receptor correspondiente (R_i). **30**

- Figura 2.8:** Esquema de la trayectoria de rayos entre un emisor (E) y un receptor (R) para un medio de una capa (izquierda) y de N capas planoparalelas (derecha). **31**
- Figura 2.9:** a) CDP gather sintético con el perfil de velocidades de intervalo de la figura 2.10 para un modelo estratificado de 4 capas; b),c) y d) CDP gathers derivados de velocidades rms (indicadas encima de cada caso), asociadas con el segundo, tercer y cuarto reflector desde el primero –que simula la capa de agua- (figura adaptada de Yilmaz, 1988). **34**
- Figura 2.10:** Función de velocidades usada para generar el CDP gather de la figura 2.9. **34**
- Figura 2.11:** Representación de un análisis de velocidades utilizando la técnica de semblance. Las trayectorias hiperbólicas que presentan mayor coherencia aparecen representadas por máximos que indican las velocidades que hay que utilizar para la corrección dinámica. **36**
- Figura 2.12:** Ejemplo de un análisis de velocidades con la técnica de semblance para el CDP 1404 de la línea 204. El panel de la derecha tiene en línea fina 15 perfiles de velocidades entre los cuales identificaremos las velocidades rms resultantes del análisis (curva de trazo más oscuro) y su correspondiente perfil de velocidad de intervalo asociado. En él vemos como las dos primeras velocidades escogidas corrigen la hipérbola de la primera y segunda llegada y coinciden con el espectro de semblanza en sus colores más oscuros, mientras que para el múltiplo, a 7000 ms, el semblance nos indica una velocidad similar a la de la primera llegada que no es, por tanto, la correcta. El panel de la izquierda contiene las 16 trazas que componen el fold del CDP corregidas por NMO aplicando el perfil de velocidades obtenido. El panel del centro contiene un pequeño stack desde el CDP 1376 al 1433 realizado con el perfil de velocidades para ver la continuidad de los reflectores a lo largo de la línea sísmica. **37**
- Figura 2.13:** Ejemplo de un análisis mediante paneles de velocidad constante para un intervalo de 30 CDP (cdp 14000-14030) de la línea 202. Cada panel representa un stack obtenido con una velocidad única de corrección, que está marcada en la parte superior,. En línea verde está marcada la velocidad rms escogida en algunos de los reflectores más visibles. TWT: doble tiempo de recorrido (Two Way Travel time). **38**
- Figura 2.14:** Ejemplo de corrección dinámica para los CDP:2800-2803 de la línea 203: a) CDP's originales; b) CDP's corregidos por NMO donde se puede observar el cambio de frecuencias (stretching); c) CDP finales una vez aplicado el corte de las señales distorsionadas. **39**
- Figura 2.15:** Representación de una traza sísmica o sismograma en términos de convolución de la respuesta de la Tierra con un impulso inicial. **42**

Figura 2.16: Espectro de frecuencias de la convolución de la respuesta de la Tierra con la fuente que da como resultado el sismograma. El sismograma tiene la forma de la fuente a gran escala. **42**

Figura 2.17: Funciones de autocorrelación de la convolución. El sismograma tiene el primer pico de la respuesta de la Tierra y el resto de la fuente. **43**

Figura 2.18: Dos ejemplos de deconvolución predictiva. La primera de las flechas indica α y la segunda $\alpha+n$. En a) y d) tenemos la autocorrelación inicial para una traza cualquiera. En b) y e) el resultado de anular la señal entre las dos flechas (filtrar). c) y f) son los filtros necesarios para la eliminación. El ejemplo superior eliminaría únicamente la primera llegada, mientras que el inferior podría servir para la primera llegada más un múltiplo (modificada de Hatton y otros, 1988). **44**

Figura 2.19: Registro de tipo a) “bow tie” obtenido en la superficie de la tierra (plano $x-t$) originado por un sinclinal en el plano $x-z$ y b) respuesta mayor en el plano $x-t$ de un elemento menor en el $x-z$ (modificadas de Stolt y otros, 1986). **45**

Figura 2.20: Ejemplo de funcionamiento de la migración para una fuente puntual en la tierra (plano $x-z$). El proceso de migración cartografía la respuesta hiperbólica registrada en la superficie (plano $x-t$) de vuelta al plano $x-z$. (Fig. modificada de Stolt y otros, 1986). **46**

Figura 2.21: Esquema sobre el funcionamiento del model ERM (figura modificada de Stolt y otros, 1986): 1. Reposicionamiento de reflectores por fuentes; 2. explosión a $t=0$; 3. Mitad de velocidad de las rocas (o la mitad del tiempo de recorrido observado). **49**

CAPÍTULO 3

Figura 3.1: Sismicidad (terremotos de magnitud mayor que 5.0 entre los años 1959-2001, red IRIS: <http://www.iris.washington.edu/>) y límites de placas y placas actual en el noreste del Pacífico. En la configuración presente la región noreste del Pacífico está dominada por la enorme placa del Pacífico. **55**

Figura 3.2: Mapa de localización indicando los principales eventos tectónicos: placas de Rivera y Cocos en subducción bajo la placa Norteamericana y zona de fallas transformantes dentro del Golfo de California. La zona de estudio está marcada por el recuadro. Las velocidades relativas de convergencia (cm/año) entre las placas oceánica y continental se indican con las flechas (Pardo y otros, 1995). EPR: East Pacific Rise; MAT: Middle America Trench; OFZ: Zona de Fractura de Orozco; TME: Tres Mariás Rise; EG: Graben de El Gordo. **57**

- Figura 3.3:** Placas tectónicas y provincias magmáticas más importantes de México. IVS=Inland Volcanic Sequences; CPB=Faja Costera Plutónica (Coastal Plutonic Belt); SMO=Sierra Madre Occidental; TMVB=Faja Volcánica Mexicana (Trans-Mexican Volcanic Belt). En negro se destacan los afloramientos máficos de lavas del Mioceno tardío. Abreviaturas: MAT=Trinchera Mesoamericana (Mid America Trench); PRR=Dorsal Pacífico Rivera (Pacific-Rivera Rise). Datos de Martiny y otros, (2000), Ferrari y otros, (2000) y Ruiz-Martínez y otros, (2000). **59**
- Figura 3.4:** Extremo septentrional del Mar de Cortés y las últimas cuencas submarinas (difíciles de identificar debido a los sedimentos del Río Colorado). La frontera continúa en la falla de Cerro Prieto que une el Campo Geotérmico de Cerro Prieto con la cuenca de Wagner para seguir más tarde por la Laguna de Salton y conectando con el sistema de fallas de San Andrés (Figura 3.5). **61**
- Figura 3.5:** El límite entre las placas Pacífico y Norteamericana en California (USA) continúa por la falla Imperial, a través de la zona de expansión de la laguna de Salton, donde comienza la rama principal de la falla de San Andrés hasta aproximadamente los 40°N de latitud, y se localiza el punto triple de la placa Juan de Fuca. **62**
- Figura 3.6 :** Mapa batimétrico iluminado desde el oeste (datos del National Geophysical Center, Institut Français pour la Recherche et l'Exploitation de la Mer y CORTES-P96). Las líneas negras continuas son las alineaciones magnéticas de Cande y otros (1989). Líneas discontinuas: Dorsal del Pacífico Este (EPR), Dorsal Moctezuma (MSS). Al norte de 17°30'N, el eje del EPR cambia de dirección hacia el N-NO hasta los 18°20'N, mientras que en la zona al este del EPR (area a) se encuentran unas pseudofallas con la forma de V simulando un aparente propagador del EPR. **64**
- Figura 3.7:** Vulcanismo en la Faja Volcánica Transmexicana (TMVB) donde se observa la conexión, a través de los volcanes de Chichón y Tacaná, con la línea de volcanes centroamericanos que son paralelos a la trinchera. **68**
- Figura 3.8:** Situación tectónica actual en el Pacífico, con los principales eventos de la zona: AT: Fosa de las Aleutianas. BP: Placa de Bismarck: microplaca del Pacífico. CaFz: fractura de Clarion. CiFz: Fractura de Clipperton. CR: Dorsal de Cocos. ECS: Mar Este de China: mayoritariamente plataforma continental. EI: Islas del Este: Isla de Pascua, hot spot en el límite de la dorsal del Pacífico Este (EPR). EPR: Dorsal del Pacífico Este. ES: Volcanes Emperador: Volcanes del hot spot de Hawai con edades superiores a 40 Ma. FI: Islas Fiji: antiguamente islas volcánicas, ahora evolucionadas a un plateau oceánico. GI: Islas Galápagos: lugar donde se encuentra una pluma mantélica de hot spot. HS: Volcanes Hawai: Hot Spot track, con volcanes entre 5Ma y 40 Ma. IBA: Arco Izu-Bonin: subducción de la placa del Pacífico bajo la placa de Filipinas. IS: Islas Salomón: actual subducción de la placa Australiana bajo la del Pacífico. KT: Fosa de las Kuriles. LHR: Lord Howe Rise: fragmento continental sumergido formado por el **72**

rifting de Nueva Zelanda y Nueva Caledonia desde Australia. LI: Islas Line: En gran parte islas volcánicas y atolones provenientes de un hot spot sumergido. LR: dorsal Louisville: hot spot track- la parte norte fue subducida pero aparece de nuevo al norte de la fosa de Tonga como Tuvalu. MA: Arco de las Marianas: arco primitivo de islas. MAT: Fosa Mesoamericana: subducción de la placa de Rivera y mayoritariamente Cocos bajo la placa Norteamericana. MB: Mar de Bering: La parte norte es plataforma continental, la parte SW son los restos de la inactiva placa de Kula. MC: Micronesia: vasta area del centro-oeste del Pacífico repleta de volcanes y atolones. MeFz: Fractura de Mendocino. MI: Islas Marshall-Kiribati-Tuvalu: extensa cadena de volcanes, hoy en día preservada como atolones. MoFz: Fractura de Molokai. MuFz: Fractura de Murray. NG: Nueva Guinea: extremo norte de la placa Australiana por encima de las placas Bismarck y Pacífico. NR: Dorsal de Nazca: dorsal asísmica (antiguo hot spot track). NR: dorsal Norfolk: fragmento continental. NZ: Nueva Zelanda: límite strike-slip entre las placas Indo-Australiana y Pacífica. PCT: Fosa de Peru-Chile: Subducción de la placa de Nazca bajo Sudamérica. SA: Samoa: atolones, típicos en el uplift anterior a una subducción. SJ : Mar del Japón: cuenca de back-arc. SO: Mar de Okhotsk: plataforma continental en las 2/3 partes norte, y cuenca de back-arc de Kuril en el sur. TA: Archipiélago de Tuamotu: amplio archipiélago de islas volcánicas provenientes de un hot spot. TKA: arco Tonga-Kermadec: subducción de la placa Pacífico bajo la Indo-Australiana. VA: arco Vamatu: subducción de la placa Indo-Australiana bajo la microplaca de Fiji.

Figura 3.9: *En la izquierda: configuración de las placas según la serie M, ilustrada para MI (121 Ma). Al menos existían tres placas, Izanagi, Farallón y Phoenix, moviéndose entre ellas y la Placa Pacífico a lo largo de, por lo menos, cinco centros de expansión. En la derecha: la isocrona MI (121 Ma) y la 32 (72 Ma) que incluyen el período estable sin inversiones de campo magnético. I es el punto triple Izanagi-Farallón-Pacífico y K el punto triple Kula-Farallón-Pacífico. Se observa la aparición de la mayoría de las zonas de fractura que funcionarán a lo largo de toda la expansión de la placa Pacífico hasta su actual enorme dimensión (figura modificada de Atwater, 1989).* **75**

Figura 3.10 *Mapa tectónico, placas y límite de placas. En trazo grueso continuo se muestra la actual localización del EPR y en trazo más fino continuo las fallas transformantes más importantes. Las dorsales abandonadas son líneas de puntos y las zonas de fractura líneas discontinuas. Trazas magnéticas o batimétricas de las distintas reorganizaciones están representadas con OOO:25 Ma; MMM:12.5-11 Ma y PPP: 6.5-3.5 Ma. Las subducciones activas están representadas con líneas con triángulos negros y las subducciones abandonadas con líneas y triángulos blancos. Los sites de los DSDP están identificados con un triángulos y su número. También se presentan las partes abandonadas de la Placa de Guadalupe (G) que ahora forman parte de la placa del Pacífico más allá de Baja California o de la placa de Cocos más allá de la fosa Mesoamericana y las cortezas identificadas hasta ahora de las placas Pacífico (P), Rivera (R) y Cocos (C). Abreviaturas: RSB (Rough-Smooth Boundary); MAT (Middle América Trench). Datos obtenidos de Klitgord et. al (1982) y Mammerickx y otros, (1982).* **78**

Figura 3.11: a) mapa geotectónico del oeste de México mostrando las principales estructuras del Mioceno. JB= bloque de Jalisco; TE, CE y TQ son los estratovolcanes de Tepetitlic, Cerobuco y Tequila; PR la caldera de La Primavera y SMO es Sierra Madre Occidental (modificado de Ferrari, 1995). b) estratigrafía del pozo CB2. La profundidad (sin escalar) sobre el nivel del mar es en metros (modificado de Ferrari, 1997). **85**

Figura 3.12: Mapa geológico simplificado de LCB, Baja California Sur, con la distribución litológica de las diferentes rocas magmáticas. En blanco se muestran los sedimentos terciarios aluviales (Schaaf, 2000). **86**

Figura 3.13: Oeste del TMVB. Los límites de placas y la convergencia entre Rivera-Norteamérica están basados en DeMets y Stein (1990) y DeMets y Wilson (1997). Las anomalías magnéticas (líneas punteadas) en la placa de Rivera son de Mammerickx y Klitgord (1982). Los triángulos son centros volcánicos: 1, Volcán San Juan; 2, Volcán Las Navajas; 3, Volcán Tepetitlic; 4, Volcán Cerobuco; 5, Volcán Tequila; 6, Complejo Volcánico de Colima: norte, Nevado de Colima; sur, Del Fuego (Richter, 2000). **87**

CAPÍTULO 4

Figura 4.1: Distribución de carbón orgánico en la Tierra. **92**

Figura 4.2: Diagrama de la distribución del carbón orgánico en la Tierra. **93**

Figura 4.3: Diagrama de fases mostrando el cambio de fase entre el gas metano libre (blanco) y el hidrato de metano (sombreado) para el sistema agua-pura y metano-puro, asumiendo un gradiente de presión hidrostática de 0.1 atm/m. Añadiendo NaCl al agua el cambio de fase del sistema se desplaza a la izquierda. Añadiendo CO₂, etano, H₂S, propano al metano el sistema se desplaza a la derecha, aumentando el área del campo de estabilidad del metano (según Katz y otros, 1959). **97**

Figura 4.4: Sección ideal para una zona de gases hidratados estables en un margen continental. La zona sombreada corresponde a los gases hidratados según las condiciones de estabilidad marcadas por la presión y la temperatura (Fig. 4.3) y asumiendo un adecuado aporte de metano. Parámetros considerados para el cálculo son: un gradiente de presión hidrostática de 0.1 atm/m; un gradiente geotérmico de 27.3°/km; y un rango de temperaturas del agua del fondo marino entre 1.5° y 18° dependiendo de la profundidad. Fuente: R.D. McIver, 1979. **98**

Figura 4.5: Perfiles de sísmica de reflexión multicanal de la campaña CORTES-P96 frente a las costas de Pto. Vallarta. En el panel superior se muestra la sección sumada; y en el inferior la **111**

sección migrada en tiempo, siguiendo el algoritmo de Kirchhoff. Detalles sobre el procesado en el capítulo 2. Exageración vertical de 7, con una velocidad de 1750 m/s.

- Figura 4.6:** Registros de los CDP's de las secciones migradas para cada uno de los perfiles (ver Fig. 4.5) donde se ilustra la inversión en la polaridad asociada con el gas hidratado. Las amplitudes que se muestran en la figura son relativas. **114**
- Figura 4.7:** Ondas generadas en una interfase por una onda P incidente. **115**
- Figura 4.8:** Inversión en la amplitud de la onda reflejada en la discontinuidad aire-agua. **118**
- Figura 4.9:** Frente de onda esférico divergente desde el centro O. **122**
- Figura 4.10:** Trazas de los tiros 3560-3573 del perfil 205, tras aplicar la corrección por divergencia esférica. En el panel superior para el canal 1, y en el inferior para el canal 7. El reflector BSR se indica con flechas. **124**
- Figura 4.11:** Esquema de una reflexión vertical donde se muestra la variación de la amplitud para cada una de las reflexiones y transmisiones de la energía. **126**
- Figura 4.12:** Perfil de velocidad de intervalo con la profundidad de las ondas P de la sección 205, entre los cdps 4100-4500. Se ha utilizado la corrección NMO una vez convertidas las velocidades RMS de stack. **128**
- Figura 4.13:** Función velocidad/profundidad de las ondas P, obtenida con distintas técnicas, en Blake Ridge, Bermuda Rise, y el margen de Cascadia. El reflector BSR, se localiza a diferentes profundidades bajo el fondo oceánico, y está marcado con círculos blancos donde se ha podido determinar (modificado de Wood y Gettrust, 2001). **129**
- Figura 4.14:** Función P-T para medidas estimadas de BSR en este trabajo (perfil 205) en comparación con medidas del ODP y medidas de laboratorio (círculos blancos) El P-T estimado para el perfil 205 se encontraría en el campo de estabilidad del gas hidratado (Modificada de Hyndman y otros, 2001). **132**
- Figura 4.15:** Localización de los perfiles 201-205 sobre la batimetría de alta resolución adquirida en la campaña CORTES-P96. Las secciones donde se ha identificado el BSR están marcadas por segmentos grises. La referencia de edad del fondo oceánico está definida por la anomalía magnética 5n.2 (9.92 Ma), señalada con segmentos discontinuos negros, y más hacia el Oeste por la anomalía magnética 4A (8.75 Ma) (isócronas magnéticas según de DeMets y otros, 2000). **134**

Figura 4.16: Interpretación de las secciones sísmicas donde se ha localizado el BSR. **143**

CAPÍTULO 5

Figura 5.1: Mapa batimétrico / topográfico regional del Margen Oeste Mexicano. Los datos pertenecen a la base mundial satelital de Sandwell y Smith, 1997. **148**

Figura 5.2: Mapa batimétrico / topográfico ampliado regional del Margen Oeste de México. Los datos pertenecen a la base mundial satelital de Sandwell y Smith, 1997. Se ha señalado los cinco dominios estructurales: Placa Pacífica, Placa de Rivera, Fosa Mesoamericana, Placa de Cocos y Bloque de Jalisco. **151**

Figura 5.3: Bloque 3-D de la topografía del suroeste Mexicano. Se muestra la localización de las estructuras más significativas estudiadas en este trabajo. Los datos pertenecen a la base mundial satelital de Sandwell y Smith, 1997. **152**

Figura 5.4: Límite de placas entre la placa de Rivera y la placa de Cocos. Datos de sonda multihaz. **153**

Figura 5.5: Datos de sonda multihaz donde se observa el fuerte gradiente batimétrico asociado a la dorsal extinta de las islas Tres Marías (Maria Magdalena Rise). **153**

Figura 5.6: Imagen de batimetría de alta resolución de la red sísmica de Puerto Vallarta, iluminada desde el oeste. Los rasgos estructurales más significativos son el cañón de Puerto Vallarta en 106.2° W, 20.3° N en tono azul (3000m), la morfología de la fosa mesoamericana donde se registran las mayores profundidades, y la plataforma continental en tonos verdes. **154**

Figura 5.7: Sonografía de la red sísmica de Puerto Vallarta. La interpretación estructural de la imagen viene marcada por las morfologías NNW-SSE asociadas a la fosa y por la diferencia de reflectividad entre los sedimentos compactados del centro de la figura, donde se cortan los perfiles, y los sedimentos poco consolidados del resto de la placa de Rivera. **156**

CAPÍTULO 6

Figura 6.1: Mapa de anomalías de aire libre del margen suroeste de México. Isolíneas cada 40 mGal. Nota: R. = Placa de Rivera. **161**

Figura 6.2: Modelización gravimétrica del perfil sísmico 203. En línea azul, se representa la anomalía observada, en línea fina, la anomalía calculada (panel superior), a partir del modelo de densidades propuesto (panel inferior). **164**

Figura 6.3: Modelización gravimétrica del perfil sísmico 204. En línea azul, se representa la anomalía observada, en línea fina la anomalía calculada (panel superior), a partir del modelo de densidades propuesto (panel inferior). **165**

Figura 6.4: Modelización gravimétrica del perfil sísmico 205. En línea azul, se representa la anomalía observada, en línea fina la anomalía calculada (panel superior), a partir del modelo de densidades propuesto (panel inferior). **166**

CAPÍTULO 7

Figura 7.1: Epicentros de sismos localizados en el suroeste de México, extraídos de la red mundial de la NOAA entre los años 1967 y 1999. Se muestra la localización de los cortes en profundidad en azul (perfiles 1 a 4), orientados en la dirección de convergencia relativa de las placas de Rivera y Cocos respecto a la Norteamericana, basado en el polo de rotación de Rivera-Norteamérica (DeMets y Stein, 1990). Nota: P.R. es Placa de Rivera; EPR: dorsal Pacífico Este. **175**

Figura 7.2: Perfiles de la sismicidad en profundidad (hipocentros) comprendiendo la fosa mesoamericana (MAT) y el Margen continental al SO de México. El origen de los cortes se encuentra entre 50 y 100 km de la fosa. Los perfiles están orientados paralelos a la dirección de convergencia entre las placas de Rivera y Cocos (DeMets y Stein, 1990; DeMets y otros, 1990). **177**

Figura 7.3: Ajuste de los planos de subducción a lo largo de perfiles sintéticos ortogonales a la costa en función de los datos hipocentrales de sismos de la región (Fig. 5.2) y proyectados sobre perfiles. **180**

CAPÍTULO 8

Figura 8.1: a-e: Secciones sumadas (stacked) para los perfiles 201, 202, 203, 204 y 205. **187**
 f-j: secciones migradas para los perfiles 201, 202, 203, 204 y 205.
 como resultado de la secuencia de procesado referido en la Tabla II-I. Exageración vertical aproximada de 1.5 (velocidad media: 5 km/s).

Figura 8.2: a-e: Interpretación de las secciones de stack y migración 201, 203, 204 y 205. **207**
 Exageración vertical aproximada de 1.5 (velocidad media 5 km/s).

Figura 8.3: a-i: Cruce de los perfiles de la red sísmica de Puerto Vallarta. **219**

Figura 8.4: Geometría y dimensiones del prisma de acreción en el oeste del Bloque de Jalisco. **238**

Figura 8.5: Bloque 3D del techo de la corteza en la red sísmica de Puerto Vallarta. Se identifican dos tendencias a la subducción, una en dirección oeste y otra menos abrupta en dirección norte. En azul, donde existen datos. En negro, resultado de la extrapolación. **241**

CAPÍTULO 9

Figura 9.1: Transecta entre Puerto Vallarta y Los Cabos. La transecta incluye datos de sísmica de reflexión y refracción (5 OBS), gravimetría, magnetismo y batimetría de alta resolución. Los segmentos en colores muestran la batimetría de la transecta y de los perfiles en la zona. Los rasgos estructurales más significativos son la dorsal del Pacífico Oriental (EPR) en línea discontinua, la zona de fractura Tamayo, en la boca del Golfo de California y la elevación de María Magdalena (MMR). Los triángulos amarillos denotan la localización de los OBS. **245**

Figura 9.2: Registros magnéticos, gravimétricos y batimétricos en el escarpe de Islas Tres Marias (ETM) y las dorsales María Magdalena (MMR) y Pacífico Este (EPR), a lo largo de la transecta entre Puerto Vallarta y Los Cabos. En el panel superior se muestra las anomalías magnéticas de expansión oceánica identificadas J(1.5 Ma) , 2 (1.8 Ma) y 2 A (3.0 Ma), en el panel intermedio la anomalía de aire libre en mGal, y en el panel inferior la batimetría del fondo oceánico. **246**

Figura 9.3: panel superior: Registro sonográfico mostrando la reflectividad del fondo oceánico (mayor sedimentación en azul). Panel medio: Batimetría de alta resolución indicando la localización del EPR y rasgos morfológicos de las crestas y valles de la zona axial, sobre las que se ha proyectado las anomalías de expansión oceánica J (1.5 Ma) y 2 (1.8 Ma). Panel inferior: Sección sumada (stacked) del perfil sísmico cruzando el EPR, nótese la relativa elevada reflectividad sobre los 0.8 s (TWTT) bajo la dorsal que posiblemente es el techo de la cámara magmática. **247**

Figura 9.4: Anomalías magnéticas de expansión oceánica a ambos lados del EPR (placas Pacífica y Rivera), proyectadas sobre la morfología del fondo oceánico. Nótese la simetría de las anomalías magnéticas identificadas J, 2 y 2A respecto de la zona de acreción oceánica (dorsal EPR). **249**

Figura 9.5: panel superior: sección stackada en el extremo sur de Baja California (Los Cabos). Panel inferior: sección stackada donde el perfil cruza la Dorsal del Pacífico Este (EPR). **251**

Figura 9.6: *panel superior: sección stackada del perfil entre el EPR y el MMR. Panel inferior: migración Stolt (velocidad del agua 1500 m/s) entre el OBS y el oeste del MMR.* **253**

Figura 9.7: *panel superior: sección stackada al Este del MMR. Panel inferior: sección stackada en la transición del dominio oceánico al dominio occidental.* **255**

Figura 9.8: *Panel superior: Ensamblajes correspondientes a los registros marinos de los OBS 1, 2, 3, 4 y 5 de la transecta Puerto Vallarta-Los Cabos. La localización se muestra en la Figura 9.1. Velocidad de reducción de 6 km/s y filtro pasobanda de 3-15 Hz. Los colores denotan las diferentes fases sísmicas. Panel intermedio: Trayectoria de los rayos de las distintas fases identificadas en el modelo global. Panel inferior: Ajuste de fases sísmicas correspondientes a las fases sísmicas identificadas en el ensamblaje.* **258**

Figura 9.9: *Modelo 2-D de velocidad-profundidad del sector oriental de la transecta Puerto Vallarta-Los Cabos, en el entorno de MMR. Líneas continuas en blanco muestran las distintas capas crustales, líneas continuas en negro son de isovelocidades. Los triángulos muestran la posición de los OBS. Modelo ajustado de los tiempos de llegada observados y calculados de los OBS 1, 2 y 3.* **264**

Figura 9.10: *Modelo 2-D de velocidad-profundidad obtenido en el oeste del perfil Puerto Vallarta-Los Cabos, cuando cruza el EPR. Los triángulos muestran la posición de los OBS. Hemos obtenido el modelo ajustando los tiempos de llegada observados y calculados de los OBS 4 y 5 y dos estaciones en el extremo de Baja California.* **266**

Figura 9.11: *Modelo gravimétrico que cruza el EPR.* **267**

Figura 9.12: *Modelo gravimétrico que cruza el MMR.* **268**

CAPÍTULO 10

Figura 10.1: *Modelo de la evolución geodinámica de la boca del Golfo de California en los últimos 3 Ma propuesto en el presente trabajo. PRR: dorsal Pacífico Rivera; MMR: dorsal María Magdalena; Anomalías J (1.5 Ma), 2 (1.8 Ma) y 2A(3 Ma).* **278**

INDICE DE TABLAS**Página****CAPÍTULO 2**

<i>Tabla II-I: Flujo del procesado aplicado a los datos de sísmica multicanal</i>	52
---	-----------

CAPÍTULO 4

<i>Tabla IV-I: Gases hidratados en sedimentos oceánicos (Kvenvolden, 1983 y Kvenvolden, 2001).</i>	101
--	------------

<i>Tabla IV-II: Ejemplo de gases hidratados encontrados en márgenes continentales.</i>	103
--	------------

<i>Tabla IV-III: Coeficiente de reflexión en la interface entre dos medios. Las velocidades están en km/s, y las densidades en g/cm^3; el signo menos denota una inversión de fase de 180°.</i>	117
--	------------

<i>Tabla IV-IV: Pérdida de energía por absorción y dispersión para un coeficiente de absorción $\zeta = 0.15$ dB/ñ, y una velocidad $v = 2.0$ km/s.</i>	123
---	------------

<i>Tabla IV-V: Coeficientes de reflexión del fondo oceánico (R_{mar}), obtenidos como la razón entre las amplitudes de las trazas del múltiple del canal 7 y la amplitud del fondo oceánico del canal 1, de los registros FFID seleccionados del perfil 205.</i>	125
---	------------

<i>Tabla IV-VI: Cocientes entre las amplitudes del BSR y del fondo oceánico para los registros 3561-3573 del canal 1 del perfil 205</i>	126
---	------------

<i>Tabla IV-VII: Coeficientes de reflexión estimados para diversas zonas del continente americano, incluyendo las obtenidas en este trabajo. Δ % representa el cambio en el producto \tilde{v} en la reflexión del gas hidratado (BSR) comparado con el producto \tilde{v} del intervalo por debajo. N es el número de tiros. Nota: * coeficientes de Shipley y otros, 1982.</i>	127
---	------------

<i>Tabla IV-VIII: Velocidades estimadas de los sedimentos hidratados. Todas las velocidades son de intervalo desde el fondo oceánico hasta el BSR, excepto el caso de Stoll y otros, 1971.</i>	130
--	------------

<i>Tabla IV-IX: Características morfológicas del BSR para los perfiles sísmicos multicanal estudiados. Valores de TWT b.f.o. y profundidad b.f.o. para las secciones en los CDP indicados. *Nota: b.f.o. = bajo el fondo oceánico.</i>	135
--	------------

CAPÍTULO 6

<i>Tabla VI-I: Densidades utilizadas para la modelización gravimétrica 2D1/2.</i>	163
---	------------

CAPÍTULO 8

<i>Tabla VIII-I: Puntos de cruce entre las secciones sísmicas al oeste del Bloque de Jalisco</i>	238
--	------------

CAPÍTULO 9

<i>Tabla IX-I: Interpretación de las fases identificadas en los registros sísmicos del perfil marino.</i>	263
---	------------

ANEXO I

<i>Tabla A-I: Flujo del procesado de cada uno de los datos y su integración.</i>	288
--	------------