

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

---

**SÍSMICA DE REFLEXIÓN EN EL ALTO GOLFO DE CALIFORNIA**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

**CÉSAR AGUILAR CAMPOS**

Ensenada, Baja California, México, Agosto de 2007.

TESIS DEFENDIDA POR  
**César Aguilar Campos**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

Dr. Mario González Escobar  
*Director del Comité*

---

M. C. Francisco Suárez Vidal  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Modesto Ortiz Figueroa  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Carlos Francisco Flores Luna  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Vítor Manuel Wong Ortega  
*Coordinador del programa de  
Posgrado en Ciencias de la Tierra*

---

Dr. Edgar Gerardo Pavía López  
*Director de Estudios de Posgrado*

24 de Agosto de 2007

**RESUMEN** de la tesis de **CÉSAR AGUILAR CAMPOS**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en CIENCIAS DE LA TIERRA. Ensenada, Baja California, México. Agosto de 2007.

## **SÍSMICA DE REFLEXIÓN EN EL ALTO GOLFO DE CALIFORNIA**

Resumen aprobado por

---

Dr. Mario González Escobar  
Director de tesis

Datos sísmicos marinos de reflexión 2D multicanal fueron procesados e interpretados con el objetivo de estudiar la estructura y sismoestratigrafía en el Alto Golfo de California, México.

El proceso aplicado a los datos sísmicos fue: 1) edición de trazas, 2) deconvolución, 3) análisis de velocidad y 4) migración, lo cual dio como resultado secciones sísmicas utilizadas para trazar y correlacionar estructuras y secuencias sedimentarias. La configuración general de las estructuras geológicas encontradas, indican que la cuenca Wagner está definida y delimitada por las fallas Consag y Wagner. El extremo norte de la falla Consag intersecta a la falla Cerro Prieto en un ángulo de  $110^\circ$ , mientras que la falla Wagner la intersecta con un azimut de  $130^\circ$ . Otras importantes estructuras interpretadas son las fallas: El Chinero, Vaquita, Montague y Gore, las cuales corren semiparalelas a la falla Consag. Posiblemente alguna de estas estructuras intersecte a la falla Cerro Prieto por debajo del delta del Río Colorado.

La configuración del basamento acústico solo se observó en la porción oriental de la falla Cerro Prieto y Wagner, mientras que en el noroeste de la región de estudio, así como en el depocentro de la cuenca Wagner no se encontró su evidencia. Por lo que posiblemente en la cuenca Wagner se encuentre a una profundidad mayor de 7 km.

Se delimitó el área de influencia de Roca Consag, al oeste de la falla Consag, la cual es un complejo volcánico. Además se ha encontrado una pequeña cuenca (El Chinero), al oeste de Roca Consag. Ignoramos si la cuenca El Chinero continúa hacia el sur del área de estudio, pues la calidad de algunas secciones sísmicas y la ausencia de líneas en el sur del golfo limitan determinar su presencia.

**Palabras Clave:** Sísmica de reflexión 2D multicanal, Golfo de California, cuenca Wagner, falla Cerro Prieto, Basamento acústico.

**ABSTRACT** of the thesis of **CÉSAR AGUILAR CAMPOS**, presented as a partial requirement to obtain the **MASTER IN SCIENCES** degree in **EARHT SCIENCES**. Ensenada, Baja California, México. August 2007.

## **SEISMIC REFLECTION IN THE NORTHERN GULF OF CALIFORNIA**

Seismic marine data of multichannel 2D reflection were processed and interpreted with the objective of studying the structure and seismostratigraphy in the northern Gulf of California, Mexico.

The process applied to the seismic data was: 1) edition of trace, 2) deconvolution, 3) velocity analysis and 4) migration, which gave as a result seismic sections used to trace and correlate structures and sedimentary sequences. The general configurations of the geologic structures found indicate that the Wagner basin is defined by the Consag and Wagner faults. The north end of the Consag fault intersects the Cerro Prieto fault at 110°, while the Wagner fault intersects this with an azimuth of 130°. Other important structures interpreted are the: The Chinero, Vaquita, Montague and Gore faults, which run semi parallel to the Consag fault. Possibly some of these structures intersect the Cerro Prieto fault beneath of the delta of the Colorado River.

The configuration of the acoustic basement was only observed in the eastern portion of the Cerro Prieto and Wagner faults, while in the northwest of the study region, as well as in the depocenter of the Wagner basin evidence wasn't found, therefore it is possible that in the Wagner basin, acoustic basement is deeper then 7 km.

The area of influence of Consag Rock was defined, to the west of the Consag fault, which is a volcanic complex. Also a small basin (El Chinero) was found west of Consag Rock. We ignore if the El Chinero basin continues toward the south of the study area, because the quality of some seismic sections and the absence of lines in the south of the gulf limit the determination of its presence.

**Words Key:** Seismic reflection 2D Multichannel, Gulf of California, Wagner basin, Cerro Prieto fault, Acoustic basement.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Wbaldo Aguilar Olvera y Alicia Campos Lucio por su amor, comprensión, confianza, consejos y apoyo económico. Gracias por guiarme por el buen camino y estar siempre al pendiente de mí, sin ustedes este trabajo no lo hubiera terminado.

A mis hermanas Claudia y Alicia Aguilar Campos por su apoyo incondicional y su constante comunicación conmigo.

A todos mis familiares por creer en mí y apoyarme en aquellos momentos más difíciles por los que pasé.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente al CONACYT por proporcionarme la beca para realizar mi estudio de maestría. Así como a Petróleos Mexicanos por proporcionar los datos que hicieron posible este trabajo y a Halliburton Drilling Evaluation & Digital Solutions de México por permitirme utilizar sus programas de procesado e interpretación de datos sísmicos gracias al Grant Universitario que tiene con CICESE.

A mi director de tesis Dr. Mario González Escobar por haberme invitado a participar en su proyecto, por todo el apoyo recibido, por su paciencia.

Al Dr. Antonio González Fernández por su ayuda durante el procesado de los datos y por la explicación de algunos conceptos básicos del proceso.

A mis sinodales, M. C. Francisco Suárez Vidal, Dr. Carlos Francisco Flores Luna, Dr. Modesto Ortiz Figueroa por apoyarme y brindarme sus valiosas recomendaciones técnicas y sugerencias en el manuscrito de la tesis.

Al Dr. Carlos Isidro Huerta López por apoyarme y guiarme durante mis primeros días en Ensenada.

A Sergio Sarregui por el apoyo técnico durante toda el la realización de mí trabajo y su ayuda para resolver los problemas de cómputo, así como sus explicaciones sobre el programa Unix.

Al Dr. Jhon Fletcher por su asesoría geológica.

Al Dr. Arturo Martín por sus consejos en la redacción de la tesis y asesoría geológica.

A todos los maestros de la División de Ciencias de la Tierra que me dieron clases: Dr. Antonio Vidal, Dr. Enrique Gómez, Dr. Carlos Flores, Dr. José Romo Jones, Dr. José Frez, Dr. Víctor Wong, Dr. Francisco Esparza.

A todos mis inolvidables compañeros y amigos de clase, salidas de campo aunque fueron pocas, y de fiesta: Carlos Iván Pérez Tinajero, Antonio Hernández, Doris Piñero Lajas, Paula García, Neptalí Requena, Victor Márquez, Violeta Luján, Olga Sarychikhina, José Mojarro, Diana Mendoza, Miriam Abad, Cristina Condori, Juan Carlos Cerda, Jazmín Chavéz, Adriana, Yleana Martínez, Felipe Escalona, Manuel Aragón, Don Alfredo, Mathias Obreski, Juliana Estrada, Gina Villalobos, Tomás Peña, Mónica Zegarra, Ricardo Carpio, Yanina Narváez, Ena Gámez, Uriel Pamplona, Juan Flores, Ramiro Tapia, a todos mis amigos de box.

Además quiero hacer un reconocimiento al personal del departamento de Ciencias de la tierra por el buen trato y el soporte de Martha Barrera, Lupita Martínez, Conchita, Humberto Benítez, José Mojarro, Ivonne Best y Citlali romero.

## CONTENIDO

	Página
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	1
I.1 Marco Geológico y Tectónico Regional.....	2
I.2 Delta del río Colorado.....	4
I.3 Cuenca Wagner.....	9
I.4 Estudios Realizados en el norte del Golfo de California.....	9
I.5 Objetivos y metas.....	14
<b>II. METODOLOGÍA.....</b>	15
II.1 Métodos Sísmicos de Exploración.....	15
II.2 Método Sísmico de Reflexión.....	15
II.3 Adquisición de los datos sísmicos.....	17
II.4 Procesado sísmico.....	18
II.4.1 Procesamiento Pre-apilamiento ( <i>pre-stack</i> ).....	21
II.4.1.a Cintas de campo.....	21
II.4.1.b Hojas de campo.....	21
II.4.1.c Geometría.....	21
II.4.1.d Edición de registros.....	22
II.4.1.e Filtrado.....	23
II.4.1.f Filtrado f-k (Frecuencia- Número de Onda).....	24
II.4.1.g Corrección por divergencia esférica.....	26
II.4.1.h Deconvolución.....	27
II.4.2 Procesamiento de Apilamiento ( <i>stack</i> ).....	28
II.4.2.a Ordenamiento de trazas por CDP.....	28
II.4.2.b Análisis de velocidad.....	29
II.4.2.c Corrección por NMO.....	31
II.4.2.d Apilamiento ( <i>Stack</i> ).....	31
II.4.3 Procesamiento post-apilamiento ( <i>post-stack</i> ).....	32
II.4.3.a Divergencia y Ganancia.....	32
II.4.3.b Filtro variable en tiempo.....	33
II.4.3.c Migración en tiempo.....	33
<b>III. INTERPRETACIÓN.....</b>	35
III.1 Interpretación de secciones sísmicas.....	35
III.1.1 Estructura.....	35
III.1.2 Estratigrafía.....	36
III.2 Características generales en las secciones sísmicas.....	39
III.2.1 Secciones sísmicas NE-SW.....	40
III.2.2 Secciones sísmicas NNW-SSE.....	44
III.2.3 Secciones oblicuas.....	46
III.3 Correlación de Fallas y Horizontes.....	47
III.3.1 Fallas.....	47
III.3.2 Horizontes.....	50

## CONTENIDO (continuación)

<b>IV. RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
IV.1 Estructuras interpretadas.....	51
IV.1.1 Falla Cerro Prieto.....	52
IV.1.2 Falla Wagner.....	53
IV.1.3 Falla Consag.....	53
IV.1.4 Falla Gore.....	54
IV.1.5 Falla Vaquita.....	54
IV.1.6 Falla Montague.....	55
IV.1.7 Falla El Chinero.....	55
IV.1.8 Roca Consag.....	55
IV.2 Basamento acústico y Cuencas.....	56
IV.2.1 Basamento acústico.....	56
IV.2.1 Cuenca Wagner.....	58
IV.2.2 Cuenca el Chinero.....	60
IV.2.3 Horizontes sísmicos.....	62
<b>V. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON OTROS DATOS   GEOFÍSICOS.....</b>	<b>67</b>
V.1 Sismicidad.....	67
V.2 Gravimetría y magnetometría.....	69
<b>VI. DISCUSIÓN.....</b>	<b>72</b>
VI.1 Falla Cerro Prieto.....	72
VI.2 Cuenca Wagner.....	73
VI.3 Horizontes sismoestratigráficos.....	75
<b>VII. CONCLUSIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>VIII. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>78</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1	Figura 1. Mapa estructural del Golfo de California. Se muestra el área de estudio (rectángulo negro) y el sistema de fallas (líneas rojas) en la Provincia Extensional del Golfo y sureste de la Provincia de Cuencas y Cordilleras (Basin and Ranges). Las principales estructuras en el Norte del Golfo son; Cuencas Wagner y Consag; FCP = Falla Cerro Prieto. E = Ensenada, CSL = Cabo San Lucas, PVT = Puerto Vallarta. Los triángulos azules son las estaciones de la red NARS ubicadas alrededor del golfo y los círculos en negro son los eventos registrados por dicha red. Además se puede observar como los eventos sísmicos se alinean con el sistema de fallas del Golfo de California (Tomada y modificada de Castro <i>et al.</i> , 2007).....	3
2	Localización geográfica y vertical de las facies en el delta del Río Colorado, dominado por las mareas. La línea roja en la figura superior, representa el perfil de la figura inferior (tomada de Jaillard, 1993).....	5
3	Efecto del peso de los sedimentos deltaicos. 1: Si no hay subsidencia, solo ocurre la progradación, el espesor del prisma sedimentario equivale a la profundidad de la plataforma continental. 2: Si hay subsidencia, el espesor de los sedimentos sobrepasa la profundidad de la plataforma. Se observa una agradación y un onlap costero. 3: Las fallas decrecimiento crean zonas de engrosamiento.....	7
4	Principales deformaciones sinsedimentarias debidas a la pendiente, el sobrepeso y la subcompactación de las arcillas en un delta (modifica de Jaillard, 1993).....	8
5	Localización del Río Colorado y su delta. El recuadro verde en la imagen izquierda esta amplificado en la imagen derecha. El recuadro rojo indica la ubicación del área de estudio. Las líneas azules en la imagen derecha indican el cauce del río Colorado, las líneas negras indican las principales fallas geológicas. Tomado de <a href="http://visibleearth.nasa.gov/">http://visibleearth.nasa.gov/</a> .....	10

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
6	Mapa de la región norte del Golfo de California, mostrando fallas, cuencas y conos volcánicos. Líneas negras con pequeños trazos perpendiculares representan fallas, contornos batimétricos cada 50 m (línea gris delgada), las principales cuencas fueron determinadas con isopacas de 150 m (áreas grises). Flechas indican el movimiento relativo de las placas Pacífico-Norteamérica. Importante hacer notar que la Cuenca Wagner, corresponden solamente a su sector sur (Figura tomada de Persaud <i>et al.</i> , 2003).....	11
7	Síntesis estructural regional del Norte del Golfo de California realizada con base en la interpretación sísmica de los datos de PEMEX. Las áreas en gris corresponden a depocentros de las cuencas activas Wagner, Consag, Delfín Superior y Delfín Inferior. (Tomada de Aragón-Arreola, 2006). Note la nula interpretación en la región más al norte del Golfo, así como las pocas líneas sísmicas en dicho sector (líneas rectas negras).....	12
8	Mapa de anomalía de gravedad residual con contornos a cada 10 mGal. Las fallas mas importantes y de extensión regional se muestran en color rojo. El triangulo en rojo indica edificio volcánico (Roca Consag). (Modificado de García-Abdesalem, 2006; Martín-Barajas <i>et al.</i> , 2006).....	13
9	Esquema del arreglo de campo para la adquisición de los datos sísmicos. La fuente de energía son cañones de aire que producen ondas acústicas las cuales son reflejadas en el subsuelo y registradas por los receptores (hidrófonos) localizados dentro del cable de registro (“streamer”). Estos están referenciados en el sistema de coordenadas UTM.....	16
10	Área de estudio y que corresponde a la parte Norte del Golfo de California. Líneas negras, representan la sísmica procesada en el presente trabajo, en rojo procesadas anteriormente por el IMP (Instituto Mexicano del Petróleo). Todas las líneas en su conjunto fueron utilizadas para la interpretación, excepto las blancas localizadas en la Cuenca Altar, Sonora (Pérez-Tinajero, 2007).....	19
11	Secuencia básica del procesamiento de datos sísmicos de reflexión.....	20

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
12	Registros sísmicos de campo a) antes y b) después de la edición para eliminar el ruido y las trazas ruidosas.....	22
13	Contenido de frecuencias de los datos. a) Registro de campo en el dominio del tiempo. b) Espectro de potencia del registro. Se aprecia que el mayor contenido de energía se encuentra entre 10-120 hz.....	23
14	a) Registro sísmico después de aplicar filtro pasa-banda mostrado. b) Espectro de potencia mostrando las frecuencias después de aplicar filtro pasa-banda de tipo Ormsby definido por el suavizado 8-10-120-125 hz.....	24
15	Análisis de frecuencias espaciales. a) Registro de campo. b) Espectro en el dominio $f-k$ en donde se han marcado la zona de aliasing espacial.....	25
16	a) Registro de campo filtrado por frecuencia y número de onda. b) Se observa que la zona de aliasing espacial ha sido atenuada por el $f-k$ .....	26
17	Registros sísmicos de campo a) antes y b) después de aplicar filtro $f-k$ , corrección por divergencia esférica y deconvolución. Las reflexiones están comprimidas y se distinguen mejor los eventos.....	27
18	Localización del CMP y CDP. Las reflexiones provienen de un mismo punto de reflejo común en el caso de capas paralelas.....	28
19	Análisis de velocidad. a) Método de espectro de semblanza, el color rojo indica zonas de semblanza alta. b) Registro de CDP's a corregir. c) Corrección dinámica por NMO de 11 CDP's. d) Método de velocidad constante.....	30
20	Corrección por NMO aplicando el modelo de velocidades. a) Área del picado de velocidades para corregir por NMO. b) Registro con los eventos hiperbólicos ocasionados por el efecto de <i>offset</i> diferente de cero. c) Corrección NMO, para remover las hipérbolas y corregir el efecto del <i>offset</i> .....	31

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
21	Sección sísmica que muestra rasgos estructurales del subsuelo. La escala vertical esta dada en tiempo doble (ms).....	32
22	Secciones sísmicas con divergencia esférica, ganancia y filtro variante en tiempo. a) antes y b) después de aplicar la migración. Obsérvese el colapso de las difracciones.....	34
23	Clasificación de terminación de capas observadas en secciones sísmicas. Las terminaciones estratigráficas son los componentes fundamentales de la sísmica estratigráfica utilizando datos de sísmica 2D.....	37
24	a) y b), sección sísmica sin y con interpretación típica de una sección: fallas y horizontes sísmicos.....	39
25	Sección sísmica 5011 a) sin interpretar; b) interpretada. Se observa como la mayoría de las fallas no cortan los depósitos en la parte superior y tampoco perturban los reflectores más profundos. La línea en color verde representa la Falla Cerro Prieto. Al <i>oeste</i> de la línea se tiene una cantidad significativa de fallas. Las líneas azules y amarillas son dos sismorefectores. En el recuadro de la izquierda la línea negra A-B muestra la localización de la sección sísmica y del lado derecho se presenta los ángulos de inclinación para las fallas.....	41
26	Sección 5017, localizado en el sector <i>oeste</i> de la región. Se tiene una serie de fallas semiparalelas y los reflectores no se observan muy deformados, siendo característico de ambientes de abanico.....	42
27	Sección localizada en la región más al <i>sur</i> del área de estudio. Se observa claramente la Cuenca Wagner limitado por fallas (sector derecho de la figura). Algo muy característico es que dentro de la cuenca se tienen un paquete de reflectores de 5 km de largo por 5 km de profundo sin que muestren gran deformación. También se observa que la mayor subsidencia de la cuenca se localiza al <i>oeste</i> . La línea negra representa el basamento acústico.....	43

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
28	Sección 5056 en el sector <i>oeste</i> y de <i>norte-sur</i> mostrando de alguna forma las características a lo largo del abanico del río. Se observa como los reflectores se encuentran basculados hacia el sur y son más gruesos. Esta línea presenta rasgos similares a lo mostrado en la Figura 25 que corresponde a una línea que corre perpendicularmente a la aquí mostrada.....	44
29	Perfil que corta la Cuenca Wagner de <i>norte</i> a <i>sur</i> (5040). Se observa claramente el límite norte de dicha cuenca (falla con línea azul en la figura), así como la subsidencia es mayor hacia dicha falla. Esta estructura se le ha asignado el nombre de Falla Consag.....	45
30	Perfil que corta la región de una manera oblicua. Se observa las características del abanico del río, presentándose una ligera pendiente hacia la región de la falla Cerro Prieto.....	46
31	Dilema en la interpretación ¿cual patrón de fallas es el correcto? Cinco fallas interceptan las cuatro líneas sísmicas. Las fallas no tienen alguna característica especial que nos ayude a su correlación. Se muestran tres de muchas posibles interpretaciones.....	48
32	Secciones sísmicas en zig-zag. En la figura inferior se muestra la localización y el trazo de éste. La línea azul marino corresponde a la misma estructura en los dos sectores, en este caso la Falla Consag. Los horizontes en cada una de las sectores es el mismo para ambas.....	49
33	Sección 5021 y pozo (Martín-Barajas et al., 2006) en el que se interpretaron los horizontes, algunas fallas y la unidad depositacional A. El color azul representa el horizonte LS-4 y el color el color amarillo el LS-3. Línea negra representa el basamento acústico.....	50
34	Principales estructuras interpretadas en la región. Punto rojo = Roca Consag. RC = La zona gris (RC) representa el área de influencia de Roca Consag. Lo achurado indica sentido y magnitud de caída. Líneas rectas blancas en desierto de Altar corresponden a líneas sísmicas interpretadas por Pérez-Tinajero (2007). Algunas estructuras no se les han asignado nombre.....	52

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
35	Basamento acústico en TD de viaje, derivado de las imágenes sísmicas. Se incluye información complementaria de la cuenca de Altar (Pérez-Tinajero, 2007) y de la Cuenca Adair (Aragón-Arreola, 2007; González, <i>et al.</i> , 2006). El recuadro representa la región en donde se tiene incertidumbre en si es basamento o un limite de secuencia. Los colores achurados, corresponden a las regiones en donde fue interpretado el basamento. .....	58
36	Configuración del depocentro de la Cuenca Wagner. Profundidad en tiempo doble (ms).....	60
37	a. Sección sísmica 5401, mostrando las Cuencas El Chinero y Wagner, b. modelo teórico considerando que EL Chinero y Wagner forman una solo unidad y c. Intrusión de Roca Consag después de que se ha depositado los sedimentos de EL Chinero y Wagner. En rojo fallas y en azul reflectores sísmicos. Observe la deflexión hacia arriba de los reflectores en las cuencas respecto a la roca Consag, lo que puede estar indicando que primeramente se dio la depositación y después intrusiono Roca Consag.....	61
38	Mapa de isolíneas de tiempo correspondiente al horizonte LS-3. Las zonas achuradas de color sobre las líneas representan los lugares dónde se interpreto el horizonte.....	63
39	Mapa de la configuración de las isolíneas de tiempo correspondiente al horizonte LS-4. Las zonas achuradas de color sobre las líneas indican los lugares dónde se interpreto el horizonte.....	65
40	Mapa de isopacas en tiempo correspondientes a la unida A. Las regiones achuradas en color sobre las líneas sísmicas representan los sitios donde se calculó el espesor en tiempo del horizonte.....	66
41	Actividad sísmica tomada de la base de datos de RESNOM, para el periodo 1979-2007 (círculos blancos). En rojo, enjambre sísmico reportado por Thatcher y Brune (1971).....	68
42	Mapa de anomalía de gravedad residual con contornos a cada 10 mGal. Las fallas se muestran en color rojo (modificado de García-Abdesalem, 2006; Martín-Barajas <i>et al.</i> , 2006).....	70

**LISTA DE FIGURAS (continuación)**

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
43	Mapa de anomalía magnética residual del campo total con contornos a cada 10 nT. Las fallas mas importantes se muestran en rojo (modificado de García-Abdesalem, 2006; Martín-Barajas <i>et al.</i> , 2006).....	71
44	Modelo estructura de la región norte del Golfo de California. Se muestra en forma esquemática los principales rasgos estructurales a nivel de basamento interpretado a partir de las secciones sísmicas. Las principales estructuras que delimitan la Cuenca Wagner, son las fallas: Cerro Prieto, Wagner y Consag.....	74

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
I	Principales parámetros de adquisición de los datos sísmicos del prospecto “San Felipe –Tiburón”.	18
II	Valores de resolución vertical	38

## LISTA DE ECUACIONES

<b>Ecuación</b>		<b>Página</b>
1	Resolución vertical $R_v$ para los datos sísmicos	37
2	La longitud de onda	38

## I INTRODUCCIÓN

El Golfo de California constituye un segmento del límite de frontera entre las placas Pacífico y Norteamérica. A diferencia de la boca del golfo, donde la formación de corteza oceánica inició alrededor de los 3.5 Ma (Persaud, 2003), el *norte* del golfo carece de ésta, ya que no presenta anomalías magnéticas simétricas; además, contiene zonas anchas de deformación difusa semejantes a las que se presentan en el continente, en la región del Valle de Mexicali e Imperial. El conocimiento actual acerca de la estructura geológica del Alto Golfo de California, proviene de estudios de sísmica de reflexión y de mapas magnéticos y gravimétricos (Phillips, 1962; Nelly y Bischoff, 1973; Pérez-Cruz, 1982; 2003, Persaud et al., 2003, Aragón-Arreola, 2006; Martín et al., 2006; García-Abdesalem, 2006; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007), sin embargo existen regiones en donde la cubierta sedimentaria impide ubicar estructuras geológicas debido a la alta razón de sedimentación y a la poca y baja magnitud de la actividad sísmica.

En este trabajo se infieren los rasgos estructurales en el extremo *norte* del Golfo de California, el cual comprende la zona del abanico del delta del Río Colorado y la Cuenca Wagner, mediante la interpretación de datos de sísmica de reflexión, cuya cobertura es de ~490 km lineales.

## I.1 Marco Geológico y Tectónico Regional

El Golfo de California en general es un sistema de *rift* oceánico extensional oblicuo, sin embargo, en la región *norte* se observa una transición de un ambiente tectónico oceánico a uno continental en el límite entre las placas del Pacífico y de Norteamérica (Nagy y Stock, 2000). La evolución del Golfo esta relacionada con diferentes procesos tectónicos; inicialmente, un régimen de subducción seguido de uno de *rift* continental, y posteriormente a *rift* oceánico generado por la interacción de las placas de Farallón, Norteamérica y Pacífico (Martín-Barajas, 2000). Estos cambios de régimen se manifestaron hace ~12 Ma con la extensión en la parte *este* de la península de Baja California. Esta zona se ha denominado Provincia Extensional del Golfo (Figura 1), la cual es una continuación hacia el *sur* de la provincia de Cuencas y Cordilleras (Basin and Range) y su límite occidental es el escarpe principal del Golfo (Henry y Aranda-Gómez; 2000). El Golfo de California varía morfológicamente y estructuralmente de *norte* a *sur*; en él se localizan cuencas conectadas por fallas transformes de rumbo lateral derecho (Figura 1). Las cuencas son más someras en el *norte*, mientras que las del *centro* y *sur* son más profundas y se les considera centros de dispersión nacientes (Curry *et al.*, 1982; Lonsdale, 1989). Estas cuencas son producidas por un sistema extensional oblicuo en el cual la deformación se acomoda en fallas transformes en el *sur* y en fallas oblicuas que pueden tener componente de desplazamiento lateral en el *norte* (Fenby y Gastil, 1991; Nagy y Stock, 2000).

Al *sur* del golfo y en su parte central, la frontera entre la placa Pacífico-Norteamérica muestra zonas de deformación bien delimitada o definida, ejemplo; la Cuenca de Guaymas y la zona de falla del Canal de Ballenas (Figura 1). En el *norte* en contraste,

contiene zonas anchas de deformación difusa semejantes a las que se tienen en el continente, por ejemplo: la región de la Provincia del Salton. Debido a la alta razón de sedimentación y la ausencia de evidencia de formación del piso oceánico, se considera que la corteza del norte del Golfo puede ser similar a una corteza transicional (Persaud, 2003).

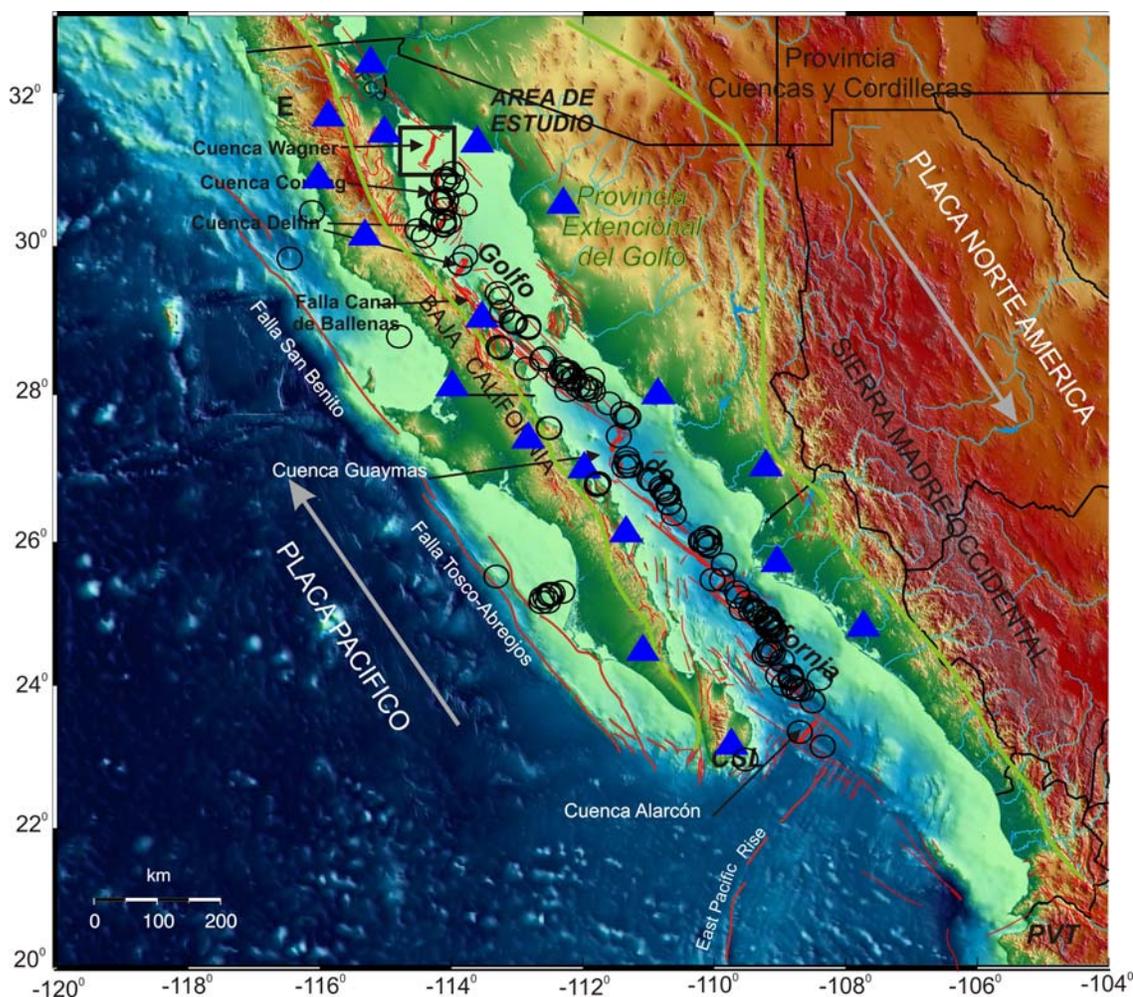


Figura 1. Mapa estructural del Golfo de California. Se muestra el área de estudio (rectángulo negro) y el sistema de fallas (líneas rojas) en la Provincia Extensional del Golfo y sureste de la Provincia de Cuencas y Cordilleras (Basin and Ranges). Las principales estructuras en el Norte del Golfo son; Cuencas Wagner y Consag; FCP = Falla Cerro Prieto. E = Ensenada, CSL = Cabo San Lucas, PVT = Puerto Vallarta. Los triángulos azules son las estaciones de la red NARS ubicadas alrededor del golfo y los círculos en negro son los eventos registrados por dicha red. Además se puede observar como los eventos sísmicos se alinean con el sistema de fallas del Golfo de California (Tomada y modificada de Castro *et al.*, 2007).

## **I.2 Delta del Río Colorado**

El papel económico de los deltas se incrementó de manera notable con el descubrimiento de nuevas fuentes de energía, ya que éstos a menudo se desarrollan en importantes cuencas sedimentarias, favorables al depósito, maduración y entrapamiento de hidrocarburos. Por lo tanto, la importancia económica de los deltas favoreció su estudio geológico detallado desde hace unos 30 años, llevando a un mejor conocimiento de sus procesos sedimentológicos y estratigráficos.

El delta del Río Colorado, se desarrolló desde el último levantamiento del nivel del mar en el Holoceno (~11550 años). Está compuesto de un cono deltaico (entre Yuma y Cerro Prieto), una planicie aluvial y un estuario bordeado por extensos pisos de lodo y es dominado por las mareas (Jaillard, 1993). Las corrientes de marea contribuyen a la formación de barras de marea arenosas oblicuas a la costa, siendo más marcadas si el aporte fluvial es más débil y si la amplitud de las mareas es importante (Figura 2). En las barras de arena se encuentran abundantes estructuras sedimentarias.

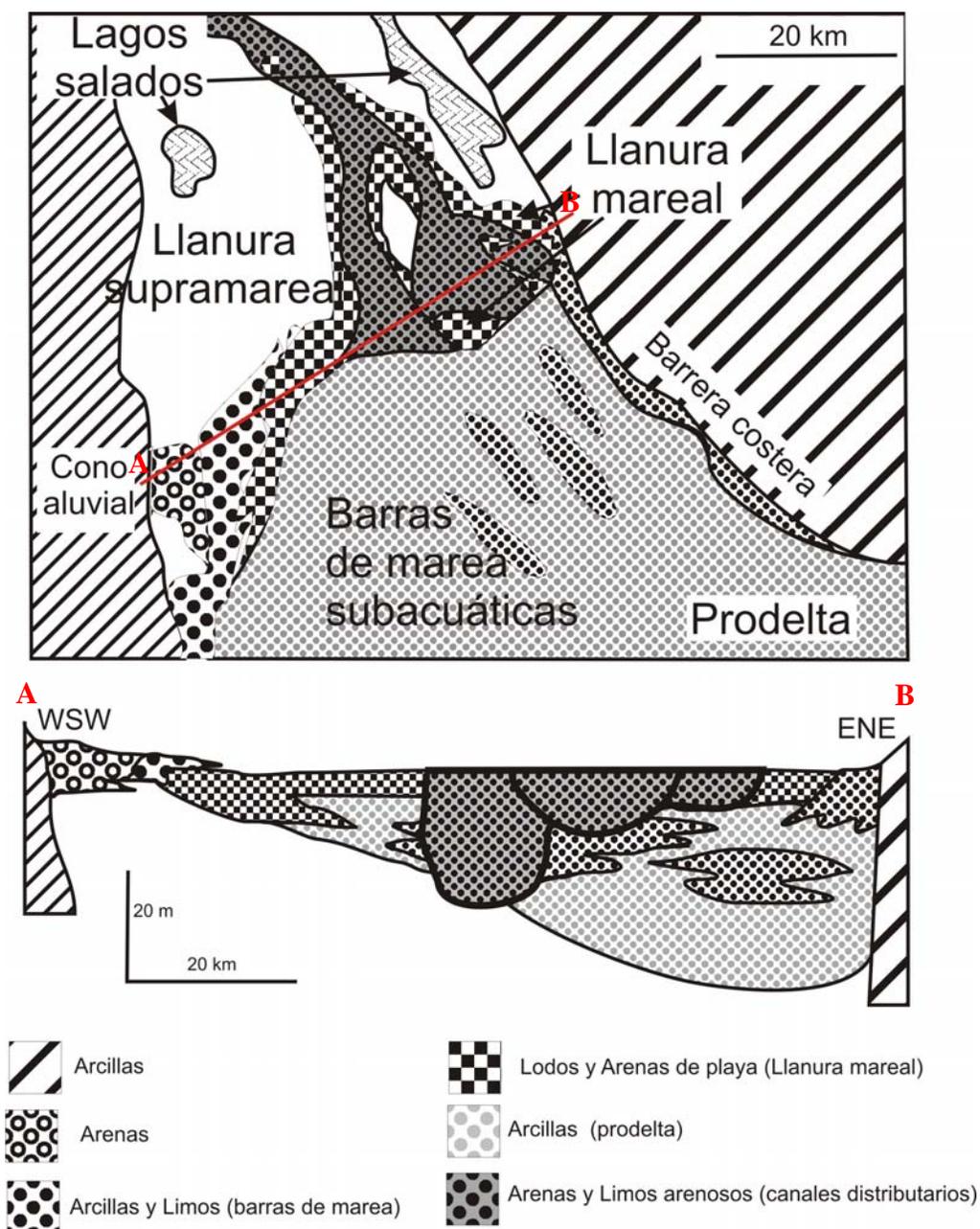


Figura 2. Localización geográfica y vertical de las facies en el delta del Río Colorado, dominado por las mareas. La línea roja en la figura superior, representa el perfil de la figura inferior (tomada de Jaillard, 1993).

Al *oeste* el delta esta limitado por las sierras Cucapah y el Mayor, mientras que al *este* termina contra el escarpe de la mesas de Yuma y San Luís Río Colorado en Sonora (Colletta y Ortlie, 1984). El delta abarca un área de  $\sim 8600 \text{ km}^2$  (Figura 5) y se ubica entre los límites de las placas Pacífico y de Norteamérica (Elders *et al.*, 1972; Lonsdale, 1989). El clima en la desembocadura del río es de tipo desértico, con una temperatura promedio mayor a los  $32 \text{ }^\circ\text{C}$  en verano y una precipitación media anual de 60 mm, siendo esta región una de las más áridas de Norteamérica (Alles, 2006). Reportes de cálculos realizados indican que en la región del delta en promedio, la profundidad del basamento es de 5.6 km y contiene más de 40,000 kilómetros cúbicos de sedimentos del Río Colorado que fueron depositados en los últimos 2 a 3 Ma (Jenning y Thompson 1986). Los sedimentos depositados por el río han sido trasladados en dirección noroeste a lo largo de las fallas del sistema San Andrés (Winkler y Kidwell, 1986).

Las centenas o miles de metros cúbicos de sedimentos observados en el delta, solo pueden ser explicados por una subsidencia activa y un continuo aporte de sedimento, ya que las secuencias unitarias deltaicas generalmente tienen solo unas decenas de metros de espesor. La subsidencia puede estar ligada a la tectónica o por simple carga litostática.

La carga litostática generada por sedimentos acumulados puede ocasionar subsidencia por una simple compensación isostática, la cual puede asociarse con la flexura elástica de la corteza. La subsidencia depende del espesor acumulado y del espacio disponible para la depositación. Por ejemplo, sobre una plataforma continental, una acumulación de 200 m de sedimento puede ocasionar una subsidencia de hasta 60 m. Para una acumulación de 4000 m sobre el talud continental, la subsidencia es de más de 1000 m.

En estos cálculos no se considera el factor tiempo (Jaillard, 1973). Esta subsidencia incrementa el espacio disponible y permite la superposición de numerosas secuencias sedimentarias, provocando un engrosamiento notable de los sedimentos, al mismo tiempo que prograda el delta (Figura 3).

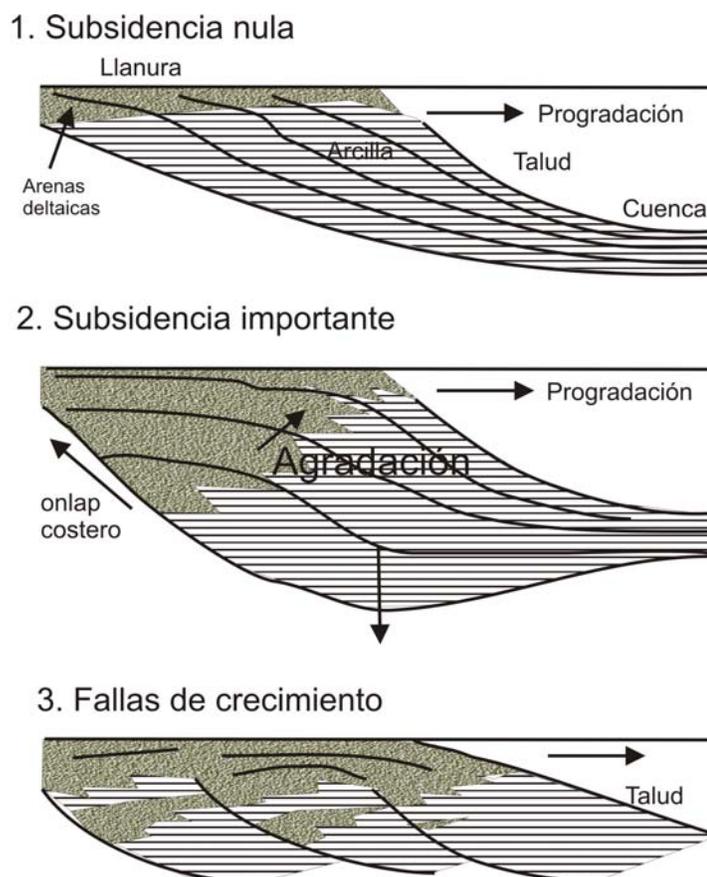


Figura 3. Efecto del peso de los sedimentos deltaicos. 1: Si no hay subsidencia, solo ocurre la progradación, el espesor del prisma sedimentario equivale a la profundidad de la plataforma continental. 2: Si hay subsidencia, el espesor de los sedimentos sobrepasa la profundidad de la plataforma. Se observa una agradación y un onlap costero. 3: Las fallas de crecimiento crean zonas de engrosamiento.

Por otro lado, las deformaciones sinsedimentarias se originan por una acumulación importante de sedimento depositado en el prodelta y sobre el talud continental. El proceso de generación de estas estructuras sedimentarias es por la acción combinada del sobrepeso y de la pendiente, lo cual llevan a la formación de domos, separados por depocentros locales pero a veces muy subsidentes (Figura 4).

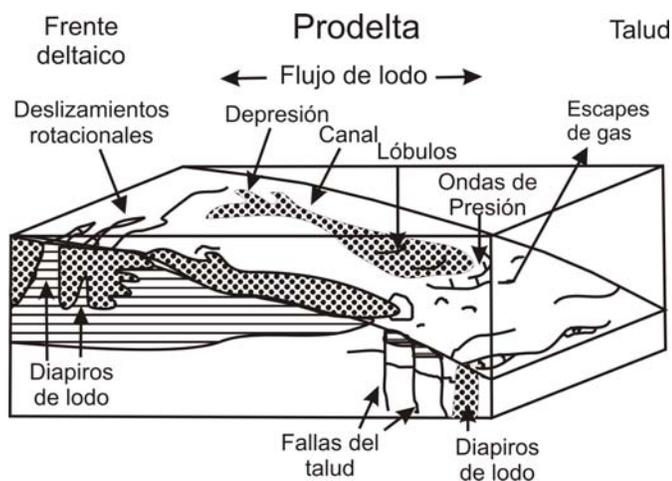


Figura 4. Principales deformaciones sinsedimentarias debidas a la pendiente, el sobrepeso y la subcompactación de las arcillas en un delta (modifica de Jaillard, 1993).

### **I.3 Cuenca Wagner**

La Cuenca Wagner es la depresión más al *norte* en el Golfo de California, tiene forma alargada y presenta una orientación N-S, su área es de  $\sim 2240 \text{ km}^2$ , se conecta al *sur* con la Cuenca Consag (Persaud *et al.*, 2003; González *et al.*, 2006) y se ubica en una zona difusa de deformación transtensional (Nagy y Stock, 2000). Fenby y Gastil (1991), infirieron que esta cuenca, es un centro de dispersión incipiente limitado al *norte* por la falla Cerro Prieto y al *sur* por un sistema de fallas de rumbo a lo largo de la Cuenca Consag (Figuras 1 y 5). Su geometría no está bien definida (Persaud, 2003). En el borde occidental de la Cuenca Wagner aflora un intrusivo dacítico conocido como Roca Consag que probablemente es producto de una actividad volcánica reciente cuya edad es menor a 1 Ma (Martín-Barajas y M. López, comunicación personal). Sin embargo, en la Cuenca Wagner no hay indicios de actividad volcánica reciente, pero sí la presencia de baja actividad sísmica y bajo flujo de calor (Frez y González, 1991).

### **I.4 Estudios Realizados en el norte del Golfo de California**

Hasta la década de los setentas, la interpretación más detallada de la tectónica del *norte* del Golfo se logró a partir de datos obtenidos de sísmica de reflexión de un solo canal colectado en 1970 (Henyey y Bischoff, 1973). A partir de estos datos, se confeccionó un mapa de fallas, mismo que estuvo limitado debido a que las secciones sísmicas presentaron una gran cantidad de múltiples reflexiones generadas por las estructuras y las reverberaciones derivadas de la señal de la fuente. Anteriormente, Phillips (1964), había estimado que la parte superficial de esta región está formada por tres capas en los primeros

25 km, mientras que Couch (1991), estima un espesor de corteza de ~13 km para la zona *norte*.

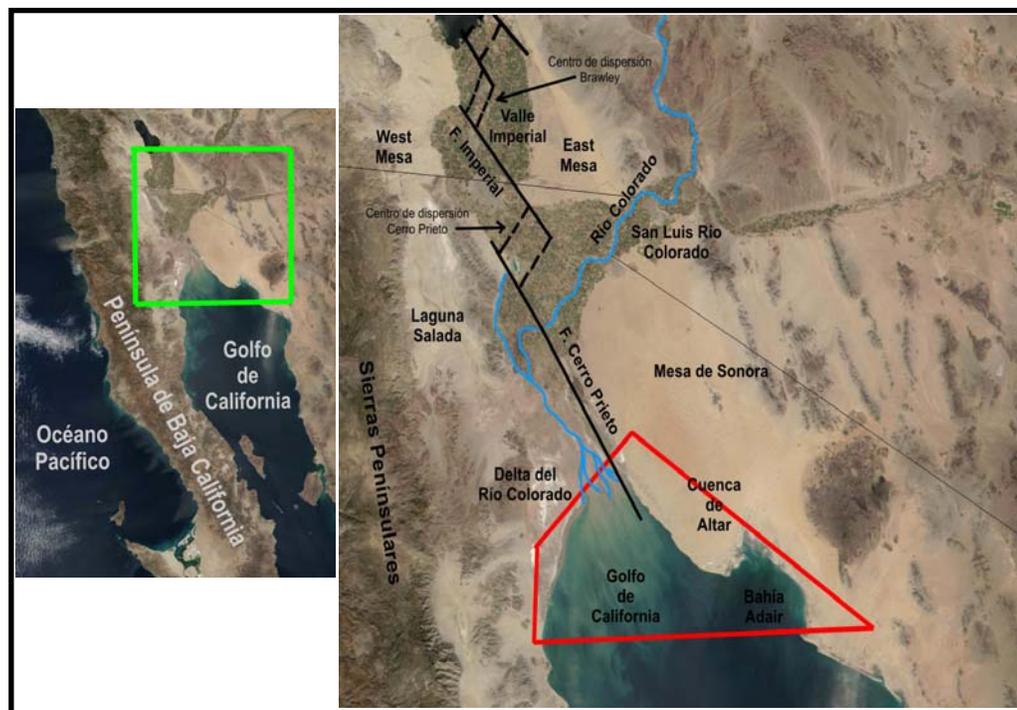


Figura 5. Localización del Río Colorado y su delta. El recuadro verde en la imagen izquierda esta amplificado en la imagen derecha. El recuadro rojo indica la ubicación del área de estudio. Las líneas azules en la imagen derecha indican el cauce del río Colorado, las líneas negras indican las principales falla geológicas. Tomado de <http://visibleearth.nasa.gov/>.

Pérez-Cruz (1982), define en lo general las cuencas; Wagner y Consag, localizadas en el *norte* del Golfo de California. Hurtado (2002), analizando líneas sísmicas en la región, reporta que el margen *este-sureste* de la Cuenca Wagner esta delimitada por una caída de basamento de ~3 km en dirección *oeste* y que probablemente esta estructura es la prolongación hacia el *sur* de la falla Cerro Prieto. El mismo autor menciona que se desconoce la conexión entre la Cuenca Wagner y la zona de falla de Cerro Prieto y propuso que ésta se efectúa mediante una zona de transferencia, constituida por un arreglo de fallas

distribuidas *en-echelón* que transfiere el movimiento entre la Cuenca Wagner y la zona de falla Cerro Prieto al *norte*. Persaud *et al.*, (2003), a partir de la interpretación de datos sísmicos de alta resolución colectados en 1999, con una resolución de metros hasta 2 km por debajo del fondo marino, reportan una gran cantidad de estructuras en el sector *sur* de la Cuenca Wagner y en la Cuenca Consag (Figura 6), así como algunas características de los depocentros en dichas cuencas, sin embargo, los datos no permiten ver las estructuras profundas. En el trabajo de los autores mencionados, no se cubrió el área del delta del Colorado ni la parte *norte* de la Cuenca Wagner.

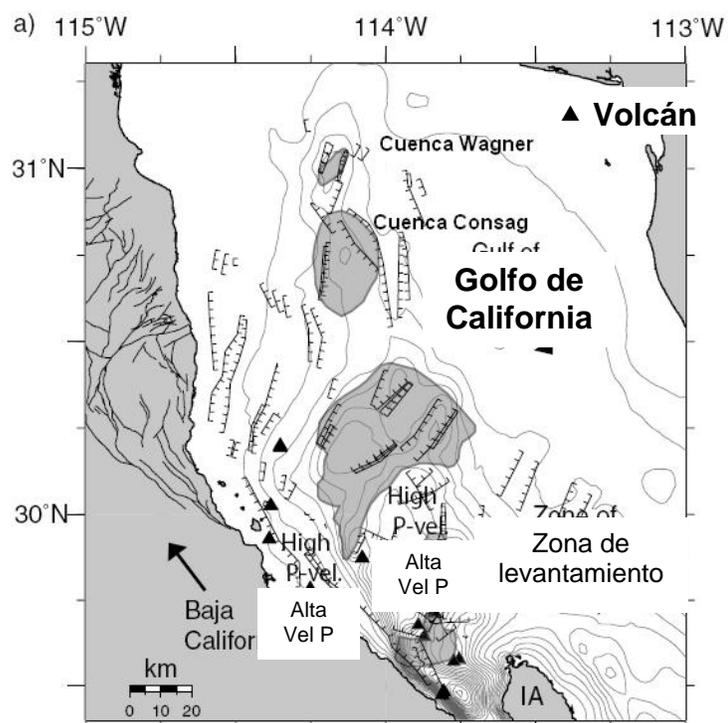


Figura 6. Mapa de la región norte del Golfo de California, mostrando fallas, cuencas y conos volcánicos. Líneas negras con pequeños trazos perpendiculares representan fallas, contornos batimétricos cada 50 m (línea gris delgada), las principales cuencas fueron determinadas con isopacas de 150 m (áreas grises). Flechas indican el movimiento relativo de las placas Pacífico-Norteamérica. Es importante comentar que Persaud *et al.*, (2003), solo estudiaron el sector sur de la Cuenca Wagner, tal y como se observa en la parte superior de la figura (Tomada de Persaud *et al.*, 2003).



García-Abdesalem (2006) y Martín-Barajas *et al.*, (2006), muestran un mapa de anomalía de gravedad para todo el *norte* del Golfo de California (Figura 8). En él se observa una anomalía en la región central de hasta -100 mg, en donde el bajo gravimétrico se extiende a lo largo de un segmento de las fallas Cerro Prieto y Wagner. Los valores van creciendo tanto al *oeste* como al *este*, indicando un posible exceso de masa, lo cual pudiera relacionarse con la presencia de basamento. Al final del presente trabajo, este mapa será comparado con nuestros resultados.

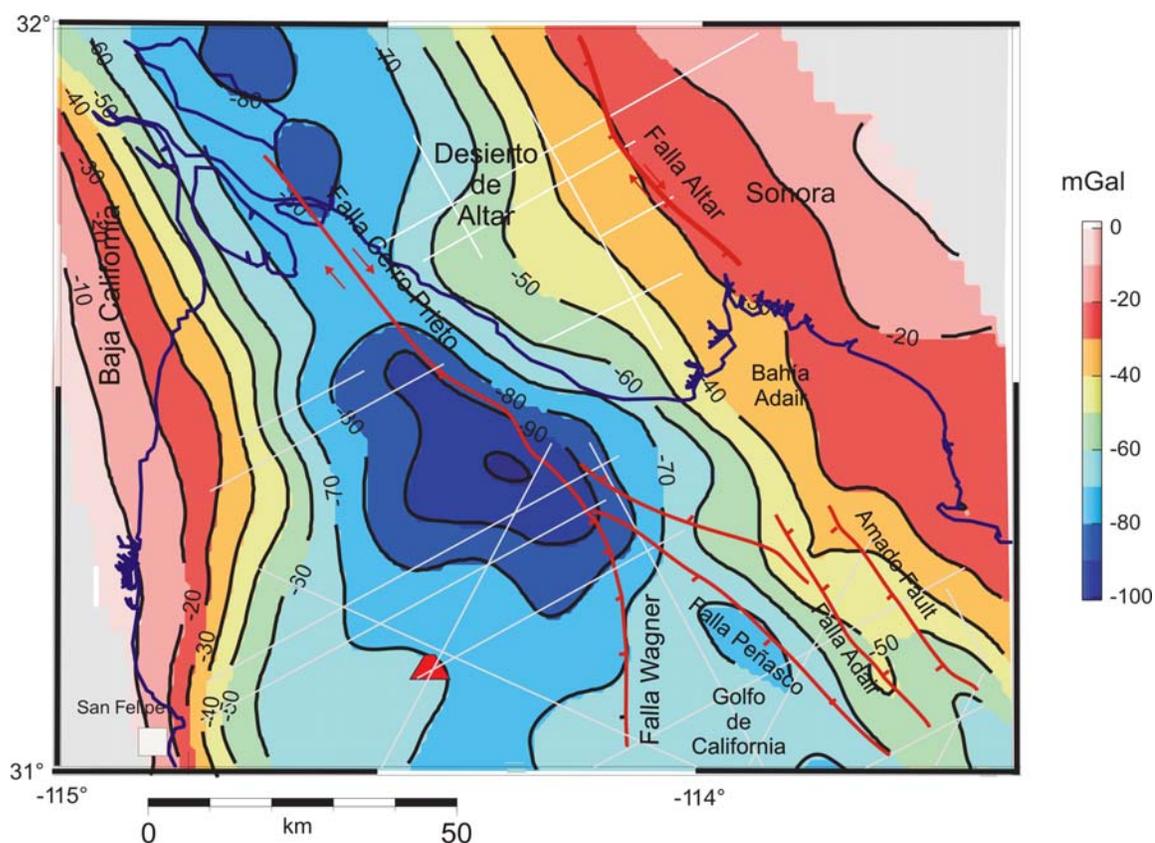


Figura 8. Mapa de anomalía de gravedad residual con contornos a cada 10 mGal. Las fallas más importantes y de extensión regional se muestran en color rojo. El triángulo en rojo indica edificio volcánico (Roca Consag). (Modificado de García-Abdesalem, 2006; Martín-Barajas *et al.*, 2006).

Por otro lado, algunos investigadores argumentan que las características batimétricas son debidas a las mareas y no a causas tectónicas (Coleman y Wright, 1975), mientras que otros asocian algunas estructuras con rasgos batimétricos (Álvarez *et al.*, 2007). Lo complejo de inferir los rasgos estructurales en la desembocadura del golfo es que éstos están oscurecidos por la alta razón de sedimentación, la poca presencia de sismos fuertes y una sismicidad muy difusa. Hasta ahora no se ha podido explicar el contraste geológico entre el *norte* y *sur* del Golfo de California, ni tampoco se tiene una cartografía detallada de las fallas que controlan la subsidencia regional (Pacheco *et al.*, 2005; Pérez-Tinajero, 2006).

### **I.5 Objetivos y metas**

El objetivo es: 1.- contribuir al conocimiento de la estructura de la región *norte* del Golfo de California, mediante el procesamiento y análisis de datos de reflexión sísmica, los cuales fueron proporcionados por PEMEX. 2.- generar conjuntamente con otros proyectos una base de datos geofísicos y geológicos del *norte* del Golfo de California.

## **II METODOLOGÍA**

En este capítulo se describe la metodología para el procesamiento e interpretación de los datos.

### **II.1 Métodos Sísmicos de Exploración**

Los métodos sísmicos de exploración son los más usados en el mundo en la prospección de hidrocarburos. Estos se basan en el mismo principio de la sismología de terremotos. La diferencia radica en que en los métodos sísmicos de exploración la fuente de energía es controlada.

El principio de este método consisten en generar ondas sísmicas mediante fuentes de energía como explosivos, cañones de aire, vibradores, etc., y medir el tiempo en el que estas ondas viajan desde la fuente hasta una serie de sismodetectores distribuidos a lo largo del terreno o en el mar, en línea recta orientada hacia la fuente. A partir del estudio de las formas de onda y su tiempo de trayecto, se generan imágenes del subsuelo que permiten determinar las características geológicas de una región.

### **II.2 Método Sísmico de Reflexión**

El método utilizado es el de reflexión, éste se basa en las reflexiones que sufre el frente de ondas sísmica cuando esta pasa a través de las distintas interfases en el subsuelo (Figura 9). Las reflexiones producidas en la interfaces son registradas en superficie por receptores que se encuentran alineados con respecto a la fuente. Este

método consiste en tres etapas principales: *adquisición de datos, procesamiento e interpretación.*

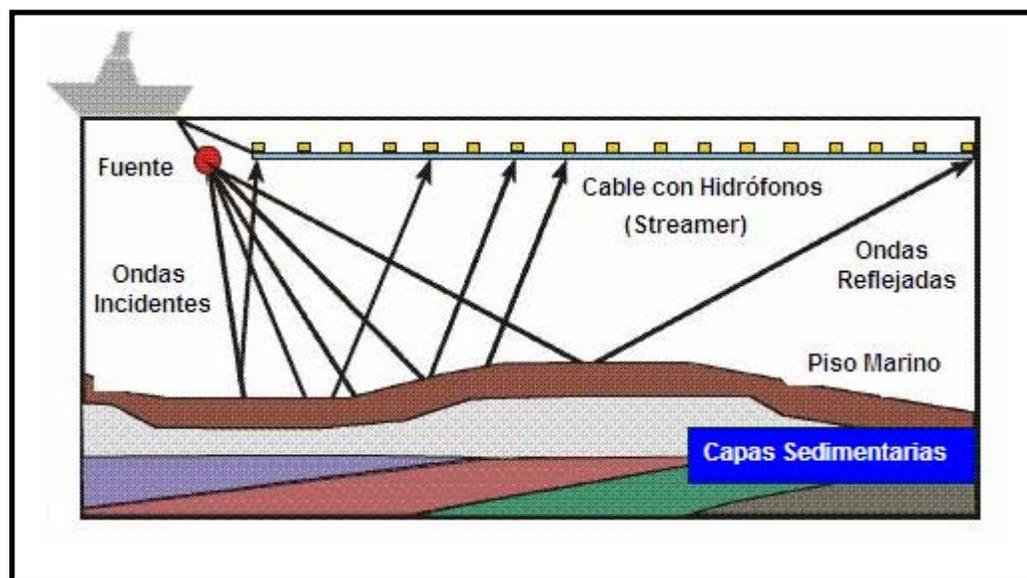


Figura 9. Esquema del arreglo de campo para la adquisición de los datos sísmicos. La fuente de energía son cañones de aire que producen ondas acústicas las cuales son reflejadas en el subsuelo y registradas por los receptores (hidrófonos) localizados dentro del cable de registro ("streamer"). Estos están referenciados en el sistema de coordenadas UTM.

En este método la distancia entre las estaciones de registro es pequeña (decenas de metros) y la de la fuente queda determinada por la profundidad hasta donde se quiera estudiar. Estas distancias son con la finalidad de asegurar el registro de reflexiones. Para tener una mejor cobertura del área de estudio se realizan varios disparos y se mueve el número de receptores, obteniéndose grupos por trazas sísmicas por cada disparo las cuales se procesan para obtener una sección sísmica.

### **II.3 Adquisición de los datos sísmicos**

Los datos sísmicos para el presente trabajo fueron obtenidos por PEMEX entre los años 1978 y 1980 como parte del Prospecto San Felipe –Tiburón (Pérez-Cruz, 1982). La información sísmica es 2D, Marina Multicanal y se obtuvo usando un arreglo de 48 canales espaciados cada 50 m, utilizando como fuente sísmica cañones de aire (1341 c.in). El tiempo de grabación fue de 6.144 s y el intervalo de muestreo fue de 2 ms, con una redundancia de 4800 %. La Tabla I muestra los parámetros de la adquisición.

Se procesaron e interpretaron 12 líneas sísmicas, las cuales suman ~490 km lineales. Estas tienen una orientación  $S60^{\circ}W$  y  $N30^{\circ}W$ , excepto dos de ellas que son oblicuas a las anteriores (Figura 10). Las coordenadas de las líneas se obtuvieron a partir de la digitalización y referencia geográfica de un mapa en coordenadas UTM proporcionado por PEMEX. Esto se realizó con la finalidad de obtener la posición geográfica de cada punto de tiro y receptor. Por otro lado, aunque en el mapa se encontraba marcada toda la trayectoria de las líneas sísmicas, muchas veces los archivos de sísmica no correspondían a las líneas o se encontraban incompletos ya que solo cubrían ciertos sectores.

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Fuente de energía	7 Cañones de Aire
Volumen/Presión	1341 c. in/1750 psi
Cable de registro	2350 m
Distancia entre fuentes	25 m
Distancia entre canales	50 m
Offset inicial	270 m
No. de Canales	48
Detectores por Traza	32
Tiempo de Grabación	6144 ms
Intervalo de Muestreo	2 ms
Numero de muestras por traza	3072
Filtro Bajo	8 hz
Filtro Alias	124 hz

Tabla I. Principales parámetros de adquisición de los datos sísmicos del prospecto “San Felipe –Tiburón”.

#### **II.4 Procesado sísmico**

El procesamiento consiste en la elección y posterior aplicación de parámetros y algoritmos de tratamiento adecuados a los datos sísmicos adquiridos en el campo con el fin de obtener secciones sísmicas de calidad. La secuencia básica del procesado de datos es: el pre-apilamiento (pre-stack), el apilamiento (stacking) y el proceso post-apilamiento. En cada uno de estas etapas se aplican una serie de procesos, como se muestra en la Figura 11.

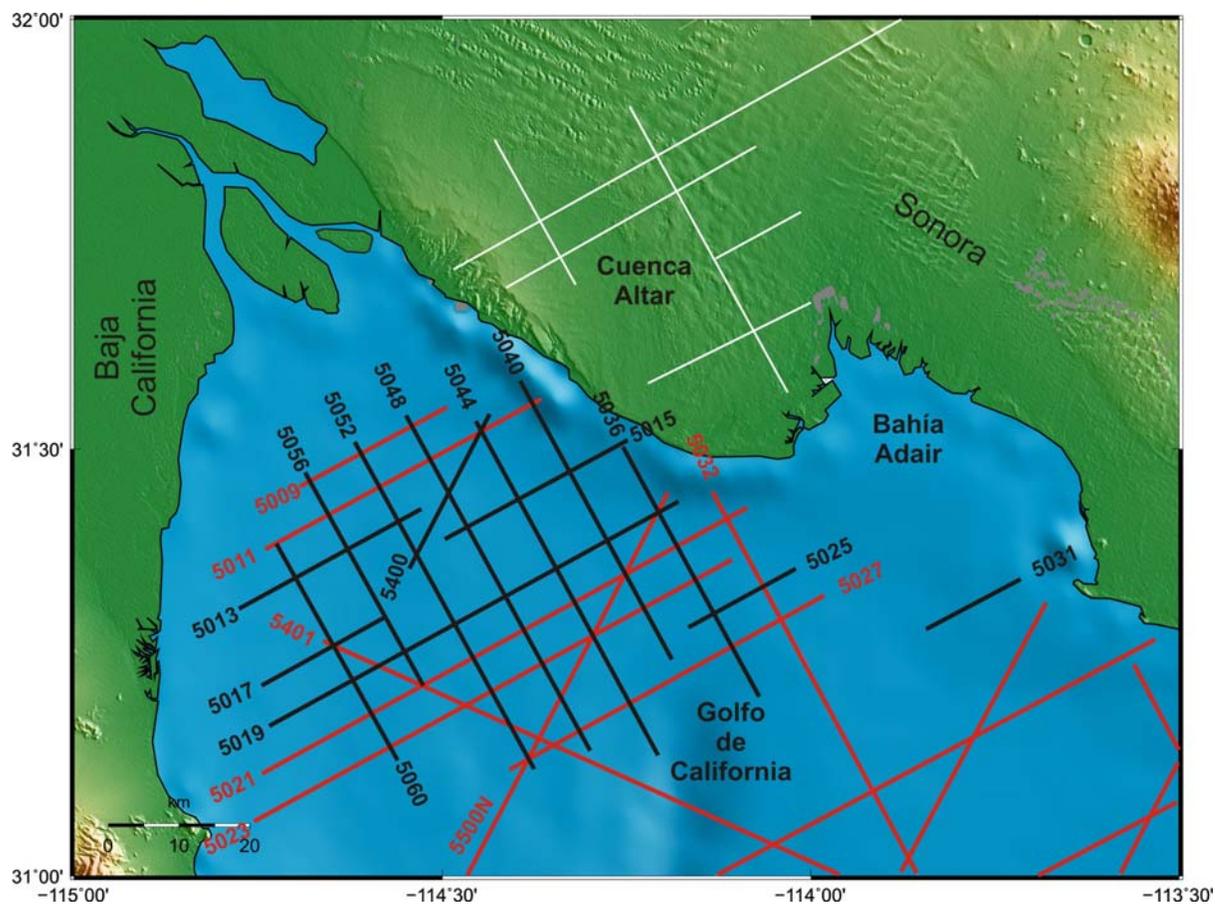


Figura 10. Área de estudio y que corresponde a la parte norte del Golfo de California. Líneas negras, representan la sísmica procesada en el presente trabajo, en rojo procesadas anteriormente por el IMP (Instituto Mexicano del Petróleo). Todas las líneas en su conjunto fueron utilizadas para la interpretación, incluyendo las blancas localizadas en la Cuenca Altar, Sonora (Pérez-Tinajero, 2007).

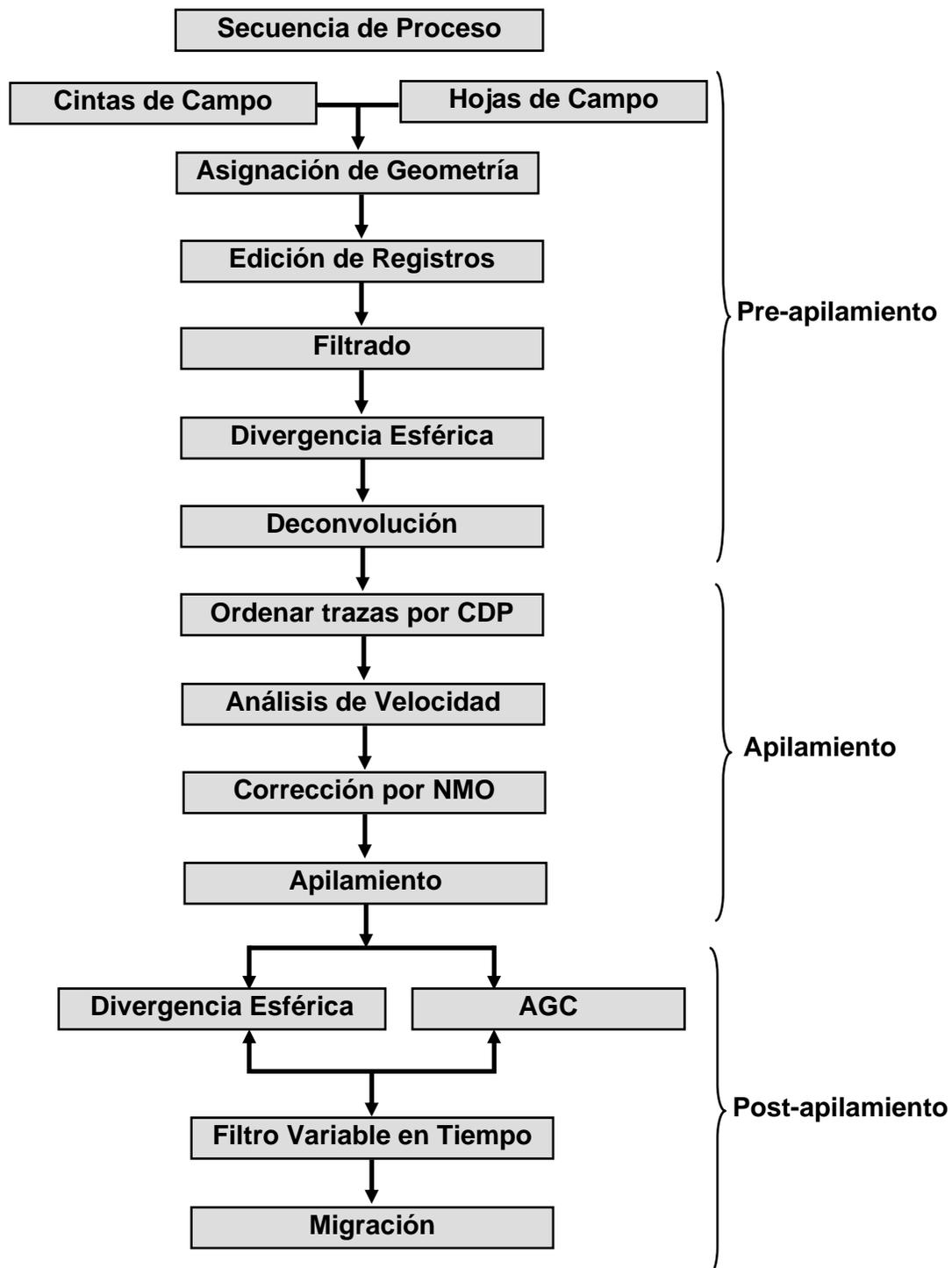


Figura 11. Secuencia básica del procesamiento de datos sísmicos de reflexión 2D multicanal.

## **II.4.1 Procesamiento Pre-apilamiento (*pre-stack*)**

### **II.4.1.a Cintas de campo**

Los datos de campo proporcionados al CICESE se encuentran en cintas en formato SEG-Y (*Society of Exploration Geophysicists*, por sus siglas en inglés), estos archivos se cargaron al módulo de ProMax de la Plataforma LandMark para efectuar su proceso.

### **II.4.1.b Hojas de campo**

Estas contienen información del recorrido que se hizo en campo, tal como: coordenadas, cruce entre líneas, fecha, hora y lugar de levantamiento, así como la disposición del tendido. Para efecto del presente trabajo no se contó con esta información, por lo que, la información requerida se obtuvo a partir de una copia heliográfica de un mapa del proyecto San Felipe-Tiburón.

### **II.4.1.c Geometría**

Una de las etapas más importantes en el procesado consiste en definir las coordenadas UTM ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) para cada estación receptora y para cada punto de tiro; así como la distancia entre fuente y receptor (*offset*), el azimut y la distancia entre receptores; de manera que las trazas de cada disparo tengan una correcta localización. La geometría fue obtenida del mapa georeferenciado proporcionado por PEMEX y asignada a las cabeceras (*headers*) de los archivos de cada registro.

#### II.4.1.d Edición de registros

En la edición de registros se eliminan todas aquellas trazas que presentan una baja relación señal/ruido (S/N) producida por el mal acomodamiento de los receptores, deficiencia en la conexión o ruido ambiental.

Para la edición se utilizó el matado de trazas (*kill*), que consiste en eliminar todas aquellas trazas que están defectuosas o muertas debido a una mala conexión de los receptores, así como la eliminación de los primeros arribos (*top mute*), que elimina la energía y el ruido de fondo que no proceden de la fuente (Figura 12).

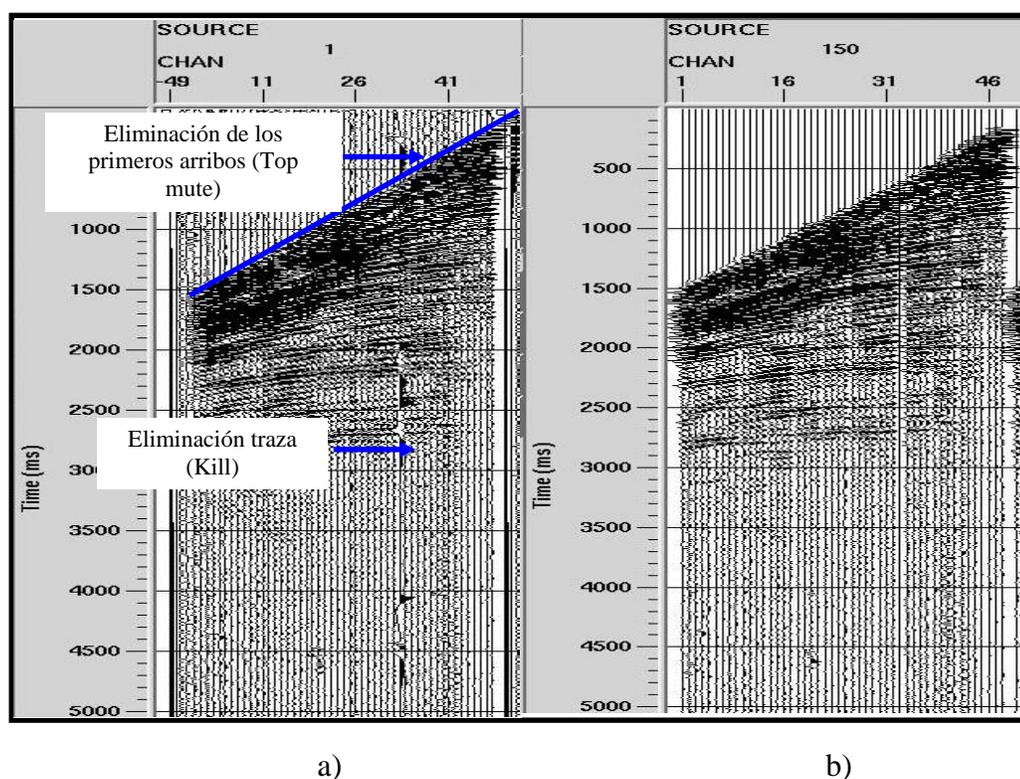


Figura 12. Registros sísmicos de campo a) antes y b) después de la edición para eliminar el ruido y las trazas ruidosas.

### II.4.1.e Filtrado

Mediante el espectro de amplitud a partir de la transformada discreta de Fourier se determinó el rango de frecuencias donde se encuentra la mayor cantidad de energía relacionada a las diferentes componentes de la señal.

En la Figura 13 se muestra el espectro de frecuencia y se observa que la mayor cantidad de energía se concentra entre los 10 y 120 hz. Por lo tanto, se diseñó un filtro pasa-banda de tipo Ormsby definido por el trapecio 8-10-120-125 hz (Figura 14). De esta manera se eliminan las componentes de frecuencia inferiores a 8 hz y superiores a 125 hz, y se atenúa las frecuencias comprendidas de 8-10 hz y de 120-125 hz. Además se puede observar una disminución significativa de las amplitudes de la onda directa (primer arribo y reverberaciones posteriores de la fuente), así como una mejor definición de las reflexiones.

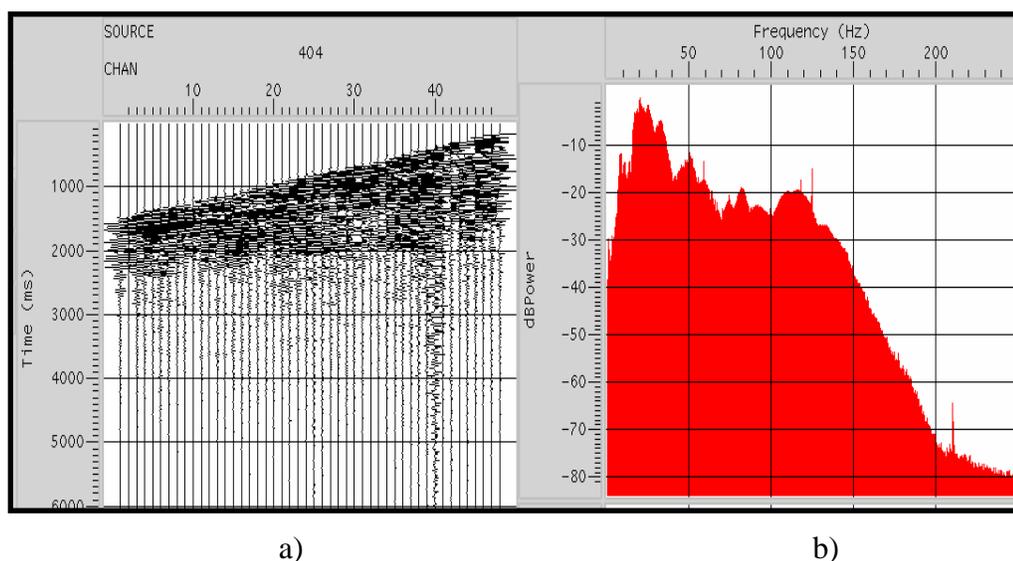


Figura 13. Contenido de frecuencias de los datos. a) Registro de campo en el dominio del tiempo. b) Espectro de potencia del registro. Se aprecia que el mayor contenido de energía se encuentra entre 10-120 hz.

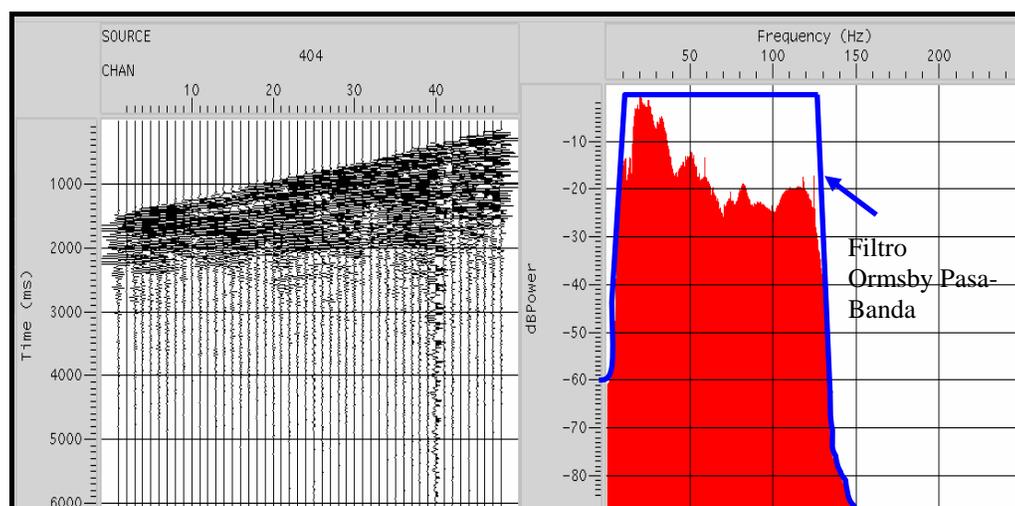


Figura 14. a) Registro sísmico después de aplicar filtro pasa-banda mostrado. b) Espectro de potencia mostrando las frecuencias después de aplicar filtro pasa-banda de tipo Ormsby definido por el suavizado 8-10-120-125 hz.

#### II.4.1.f Filtrado $f-k$ (Frecuencia- Número de Onda)

Este filtrado permite eliminar ciertos tipos de energía no deseados como ruido coherente lineal (en forma de ground roll), ondas guiadas que pueden oscurecer las reflexiones de los datos grabados. También permite identificar problemas de aliasing ocasionados por un muestreo espacial insuficiente durante la etapa de adquisición de datos. Este tipo de ruido se evidencia por una repetición de las pendientes en la región opuesta del espectro.

En la Figura 15 se observa que los datos están afectados por el fenómeno de aliasing espacial. Para atenuar este efecto se aplicó un filtro a cada disparo definido por un trapecio que encierra la zona donde esta presenta la energía de la señal, dejando pasar solo las frecuencias y números de onda contenidos dentro del trapecio (Figura 16).

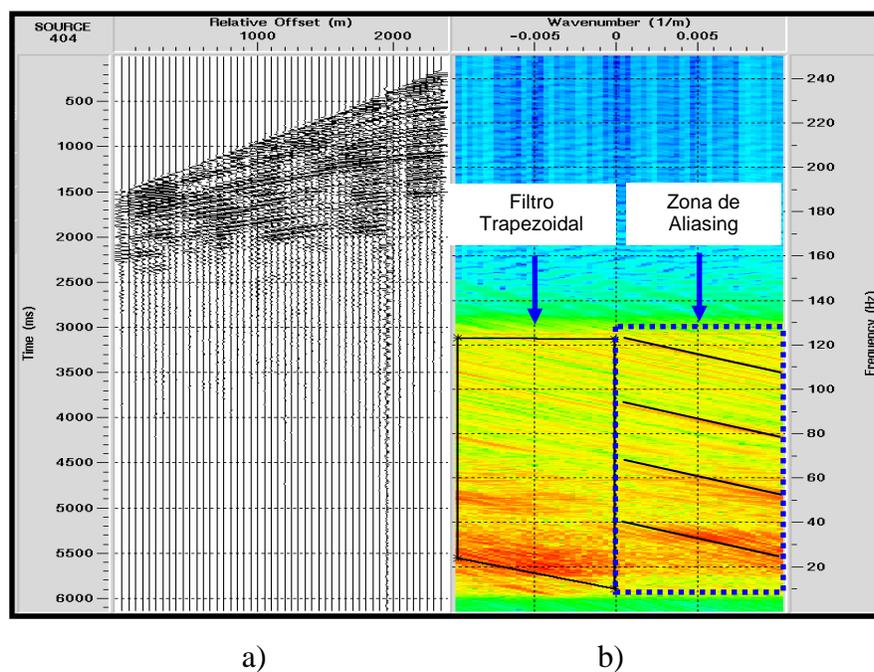


Figura 15. Análisis de frecuencias espaciales. a) Registro de campo. b) Espectro en el dominio  $f-k$  en donde se han marcado la zona de aliasing espacial.

En la figura 15 b, el rectángulo de líneas punteadas color azul define la zona de aliasing, esta zona es la parte de la señal que se va a eliminar. Mientras el trapecio definido por la línea negra continua es la parte de la señal sísmica que se va a utilizar para obtener las secciones sísmicas. En la figura 16 b se puede apreciar que dentro del rectángulo color rojo el efecto de aliasing ha sido atenuado.

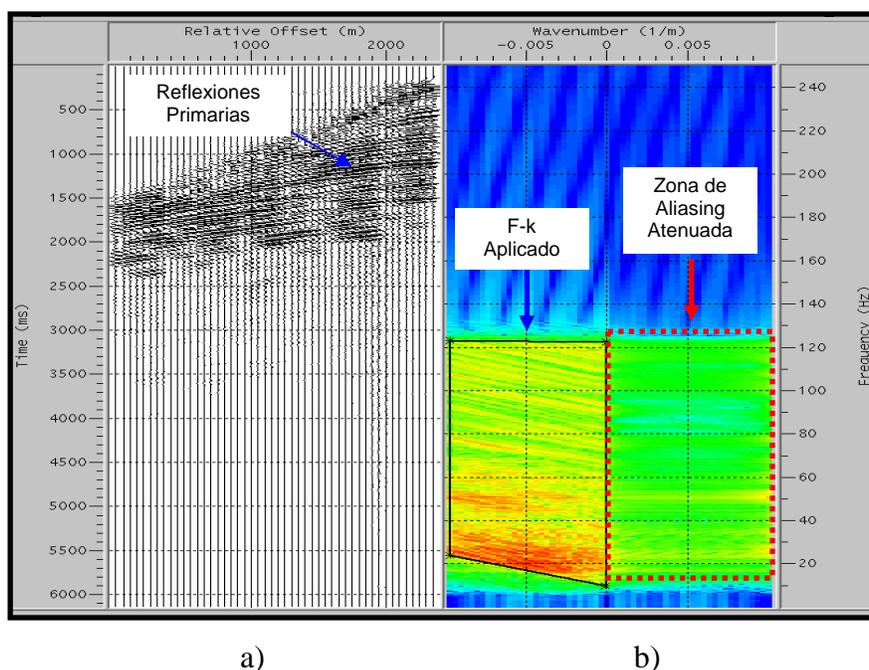


Figura 16. a) Registro de campo filtrado por frecuencia y número de onda. b) Se observa que la zona de aliasing espacial ha sido atenuada por el  $f-k$ .

#### II.4.1.g Corrección por divergencia esférica

Cuando los frentes de onda se alejan de la fuente, estos aumentan gradualmente, provocando que se registre una amplitud de la señal cada vez más débil hacia los receptores más alejados. Por lo que se debe hacer correcciones a los datos para recuperar la amplitud perdida. Esto es válido por el hecho de que la amplitud es inversamente proporcional a la distancia (offset), cuando se asume una velocidad constante (McQuillin *et al.*, 1979). En cambio si se supone el aumento de la velocidad con la profundidad, la recuperación de las amplitudes se realiza con el uso de un modelo de velocidades. Para la región *norte* del Golfo de California la corrección inicial se efectuó empleando la velocidad de propagación de las ondas en la capa de agua (1500 m/s aproximadamente) para toda la sección sísmica.

Posteriormente se volvió a hacer un segundo análisis de velocidad, para la corrección por divergencia esférica.

#### II.4.1.h Deconvolución

La deconvolución consiste en la compresión de la ondícula básica mejorando la resolución temporal de los datos sísmicos. Esta puede ser aplicada antes del apilamiento (*stack*) y/o después del apilamiento (*post-stack*) (Yilmaz, 1987). Mediante la deconvolución puede ser atenuado y/o removido el ruido coherente como múltiple o reverberación producidas por la capa de agua (Figura 17).

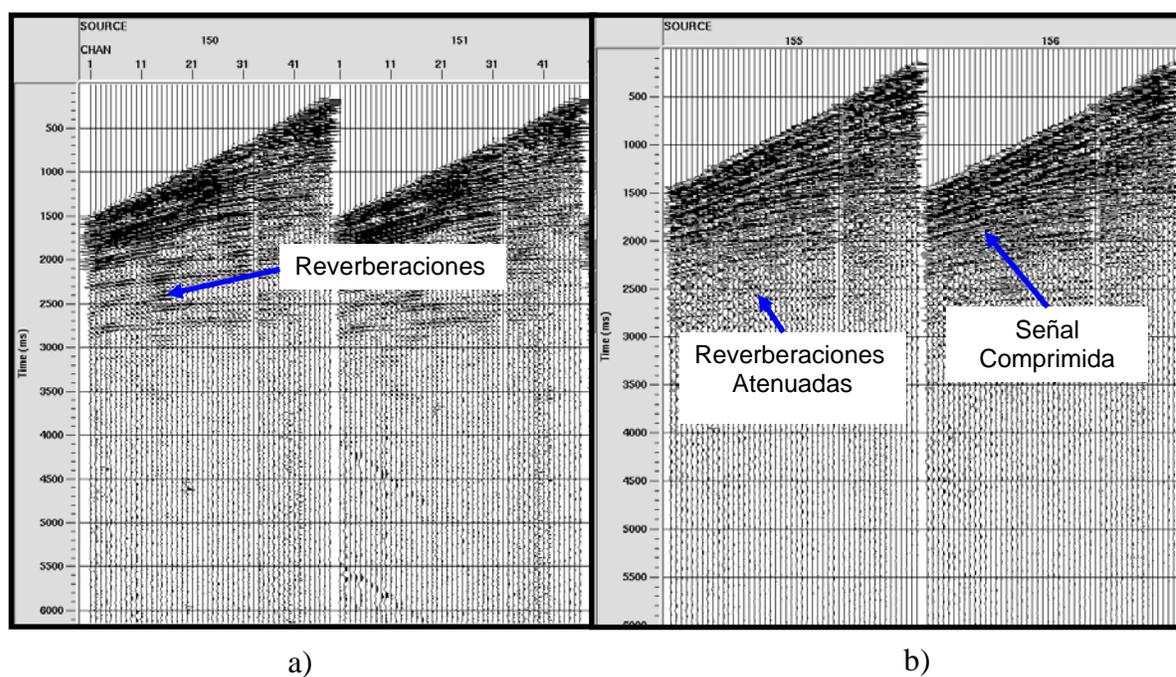


Figura 17. Registros sísmicos de campo a) antes y b) después de aplicar filtro  $f-k$ , corrección por divergencia esférica y deconvolución. Las reflexiones están comprimidas y se distinguen mejor los eventos.

## II.4.2 Procesamiento de Apilamiento (*stack*)

### II.4.2.a Ordenamiento de trazas por CDP

Consiste en la organización y agrupación de las trazas por geometría de cada disparo perteneciente al mismo punto de reflejo común. Este punto de reflejo común o CMP (*Common Midpoint*, por sus siglas en inglés) se ubica a la mitad de la distancia que existe entre fuente y receptor. A la proyección del punto de reflejo común en profundidad se le llama CDP (*Common Depthpoint*, por sus siglas en inglés) (Figura 18).

El objetivo de este ordenamiento es agrupar las trazas del mismo punto reflector y sumarlas para obtener una traza resultante (Traza CDP) que posee una mejor relación señal/ruido.

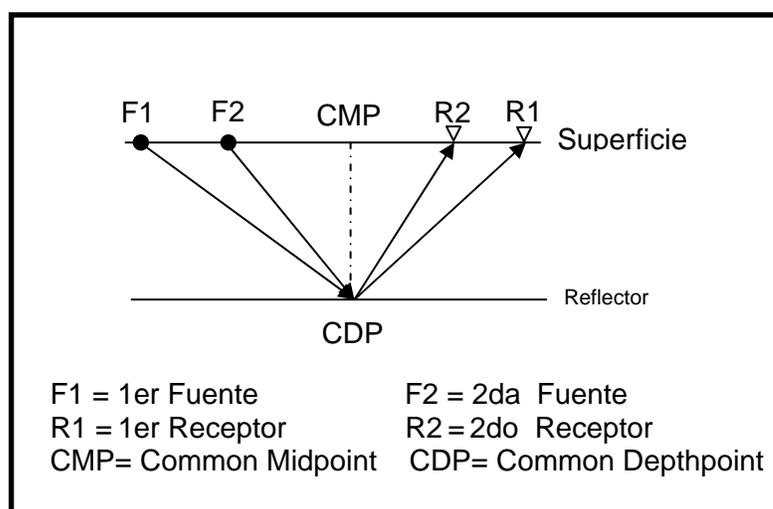


Figura 18. Localización del CMP y CDP. Las reflexiones provienen de un mismo punto de reflejo común en el caso de capas paralelas.

#### **II.4.2.b Análisis de velocidad**

El análisis de velocidad consiste en obtener una ley de velocidades acorde con las características geológicas del subsuelo. Este se realiza sobre los CDP para estimar las velocidades que están asociadas a las interfases de los reflectores que tienen un fuerte contraste en impedancia acústica. Una vez hecho el análisis se obtiene un modelo de velocidades que se cumpla para hacer correcciones por divergencia esférica necesario para obtener un modelo de velocidades óptimo que permita hacer el apilamiento y así finalmente adquirir una sección sísmica. Los análisis se realizaron en intervalos de distancia igual a 1 km sobre grupos de 11 CDP's.

En esta etapa de análisis de velocidad se utilizaron dos métodos los cuales son el espectro de semblanza y el de velocidad constante. En el método de espectro de semblanza se despliegan gráficos con una serie de máximos y mínimos que se disponen como isolíneas de igual semblanza, en estas gráficas se van a localizar las zonas de valor máximo de semblanza, que representarían aquellos reflectores con mayor contraste en impedancia acústica y horizontalidad. Se debe tener cuidado de no seleccionar la semblanza de las múltiples, la cual se caracteriza por tener una velocidad menor que la del reflector primario (19a).

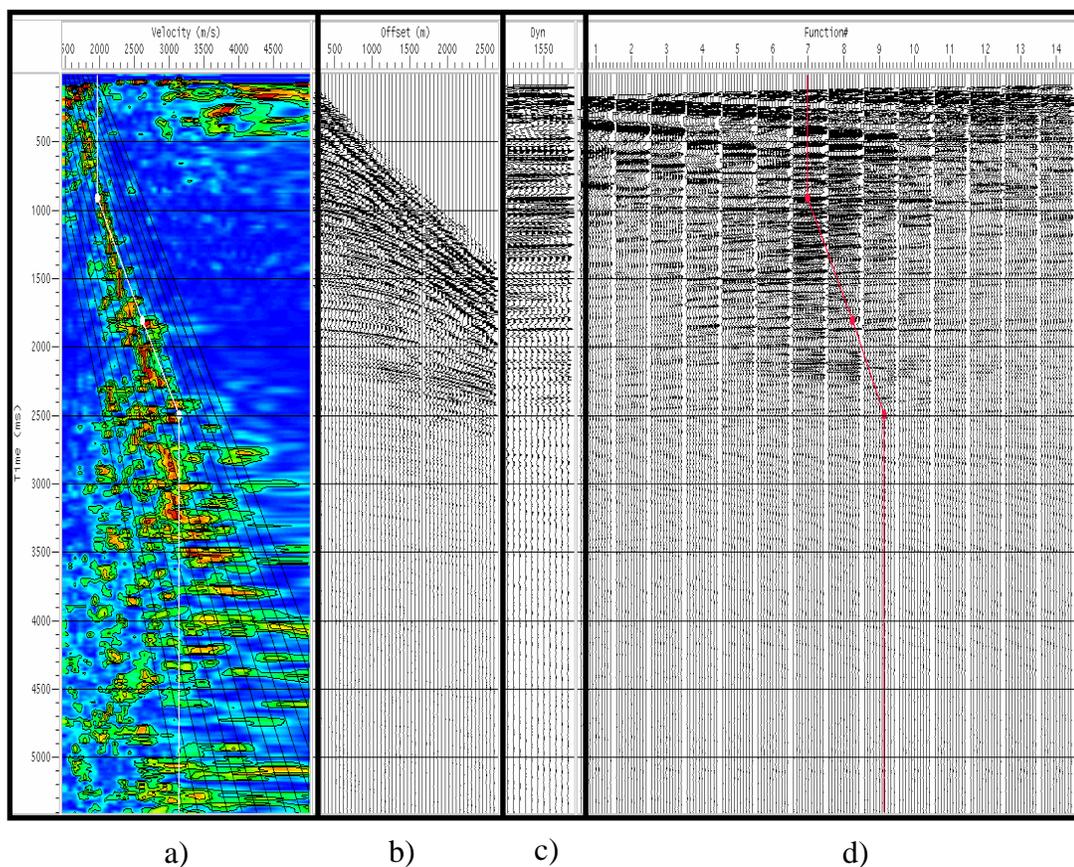


Figura 19. Análisis de velocidad. a) Método de espectro de semblanza, el color rojo indica zonas de semblanza alta. b) Registro de CDP's a corregir. c) Corrección dinámica por NMO de 11 CDP's. d) Método de velocidad constante.

Simultáneamente, se aplica el método de velocidad constante, el cual consiste en hacer gráficas de prueba y error, poco preciso, pero visualmente efectivo (Figura19d). Se generan grupos de CDP y a cada grupo se le aplican diferentes velocidades, las cuales son constantes para corregir por NMO. Las ondículas que muestran la horizontalidad en los registros indican que la velocidad es adecuada para corregir por NMO. Debido a que las velocidades aplicadas son constantes para cada CDP gather, funcionan sólo en el intervalo de tiempo específico.

### II.4.2.c Corrección por NMO

Esta corrección lleva a la horizontalidad a aquellos reflectores que tienen una superficie hiperbólica. Para esta operación se hace uso del modelo de velocidades obtenido del análisis de las velocidades. Si el modelo de velocidades es correcto los registros resultantes tendrían reflectores horizontales (Figura 20).

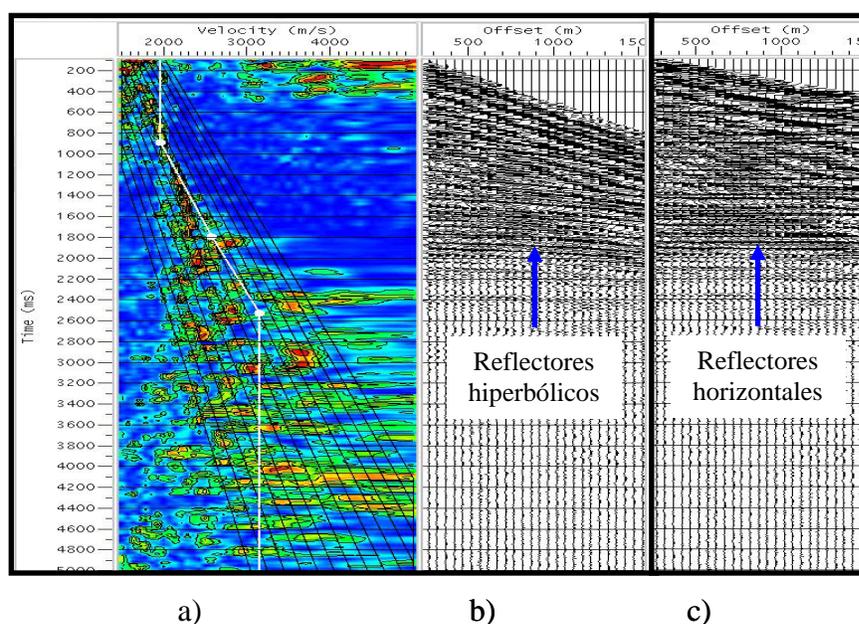


Figura 20. Corrección por NMO aplicando el modelo de velocidades. a) Área del picado de velocidades para corregir por NMO. b) Registro con los eventos hiperbólicos ocasionados por el efecto de *offset* diferente de cero. c) Corrección NMO, para remover las hipérbolas y corregir el efecto del *offset*.

### II.4.2.d Apilamiento (*Stack*)

Una vez que se han hecho las correcciones por NMO, se procede a sumar (*stack*) todas aquellas trazas provenientes de un mismo punto de reflejo común. Este proceso se realiza con la finalidad de generar una imagen preliminar del subsuelo (Figura

21). La sección obtenida aún no es la definitiva, ya que se hacen varios análisis de velocidad para obtener un mejor stack.

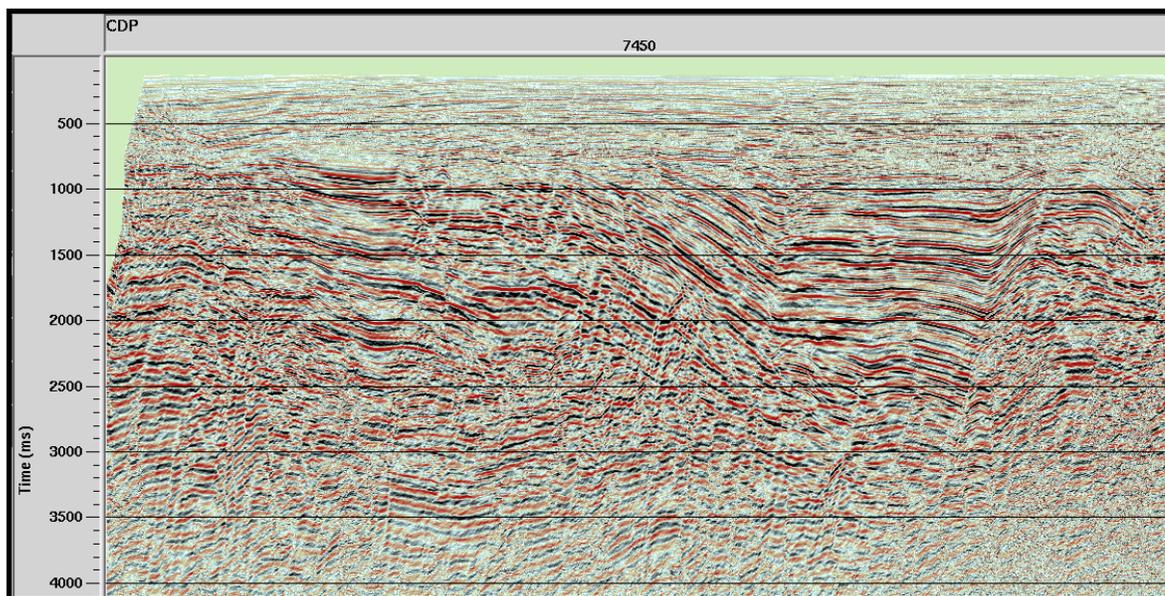


Figura 21. Sección sísmica que muestra rasgos estructurales del subsuelo. La escala vertical esta dada en tiempo doble (ms).

### II.4.3 Procesamiento post-apilamiento (*post-stack*).

#### II.4.3.a Divergencia y Ganancia

Al apilamiento se le realiza un segundo proceso de corrección por divergencia esférica utilizando el modelo de velocidades resultante de la corrección por NMO, agregándole ganancia a cada traza para aumentar las amplitudes de las ondas atenuadas por efecto de dispersión de la energía a tiempos mayores de arribo.

#### **II.4.3.b Filtro variable en tiempo**

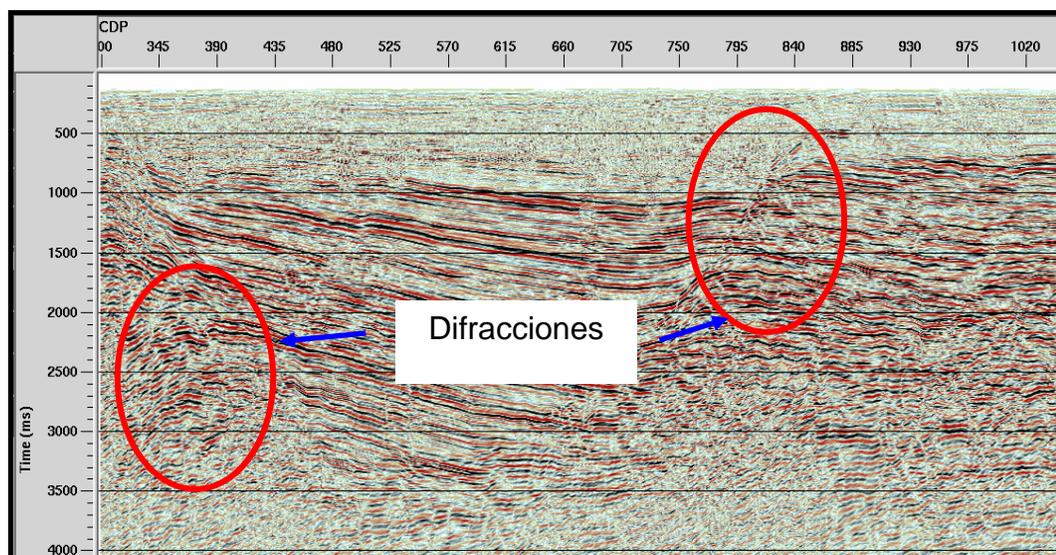
El filtrado variable en tiempo es un filtro pasa-banda que elimina el ruido relacionado a bajas y/o altas frecuencias que se presentan en bandas de tiempo en la sección apilada. Las frecuencias altas que persisten a tiempos relativamente grandes deben ser atenuadas, ya que tomando en cuenta el efecto de absorción por el subsuelo de las frecuencias elevadas a medida que se incrementa la profundidad, tales componentes deben corresponder a ruidos (Yilmaz, 1987).

#### **II.4.3.c Migración en tiempo**

La migración es un proceso que mueve la inclinación de los reflectores a su verdadera posición en el subsuelo, colapsa difracciones y delinea detalles en el subsuelo como planos de falla (Yilmaz, 1987) (Figura 22). Además colapsa las difracciones de fuentes secundarias como terminaciones de un reflector contra fallas.

La migración de Kirchhoff fue utilizada en este trabajo para migrar en tiempo, usando el modelo de velocidades del subsuelo construido a partir de los análisis de velocidades de la corrección de “NMO”.

a)



b)

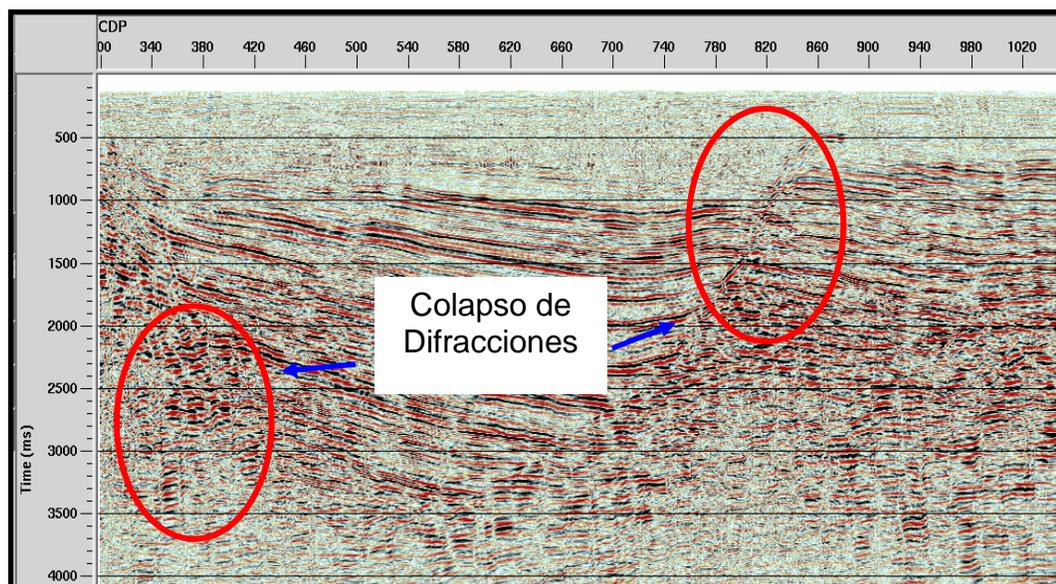


Figura 22. Secciones sísmicas con divergencia esférica, ganancia y filtro variante en tiempo. a) antes y b) después de aplicar la migración. Obsérvese el colapso de las difracciones.

### **III INTERPRETACIÓN**

En esta sección se describe la interpretación de las líneas procesadas, mejor conocidas como secciones sísmicas. Se realiza una interpretación de manera individual en cada una de las secciones, posteriormente se efectúa una correlación entre ellas para delinear los principales rasgos estructurales y horizontes sísmicos en toda el área de estudio.

#### **III.1 Interpretación de secciones sísmicas**

Se procede a realizar el trazado de fallas y horizontes en cada sección. En la interpretación sísmica se asume que la impedancia acústica (producto de la velocidad y densidad) es la que genera eventos coherentes en las secciones sísmicas que están asociados con estratificaciones geológicas, por lo que el tiempo de llegada de los eventos coherentes está relacionado a la estructura (Yilmaz, 1987). De acuerdo con estas suposiciones, se realizó la interpretación geológica de las secciones sísmicas, identificando eventos o reflectores que poseen continuidad lateral, así como rasgos estructurales (fallas, o pliegues) y estratigráficos (discordancias), como se muestra en la Figura 23.

##### **III.1.1 Estructura**

Cuando la continuidad lateral de un reflector en una sección sísmica termina abruptamente y después aparece desplazado, indica la presencia de un plano de falla. Además, las reflexiones tienen un carácter distintivo que permite identificar los lados opuestos de la falla (Figura 24). Con estas consideraciones se han marcado las fallas que se

aprecian en las secciones sísmicas, para después correlacionarlas con otras secciones y así establecer los rasgos estructurales dominantes.

La resolución de los datos permitió delimitar estructuras, algunas ya conocidas y/o inferidas reportadas en la literatura y otras, hasta ahora desconocidas. La calidad de los datos sísmicos permitió tener buena resolución a partir de 0.4 a 4 s de tiempo doble de viaje (TD), a pesar de que las secciones fueron registradas hasta un tiempo de 6 s (TD). En algunas secciones, en los intervalos de 0.2 a 0.4 s y de 4 a 6 s, se presentan zonas difusas que son muy difíciles o imposibles de interpretar.

### **III.1.2 Estratigrafía**

De acuerdo a Liner (2004), el estudio de la estratigrafía está centrado en dimensiones de la roca que varían en un rango de  $10^{-5}$  m (tamaño de granos) a  $10^5$  m (sistemas depositacionales). Con la resolución de nuestros datos, solo se pueden resolver características de algunas decenas de metros de espesor en adelante (Ecuación 1 y Tabla II) y el doble de esto para los rasgos laterales de las capas. Por lo que para nuestros datos sísmicos de 2D, solo características a gran escala pueden ser evidentes, como se muestra en la Figura 23.

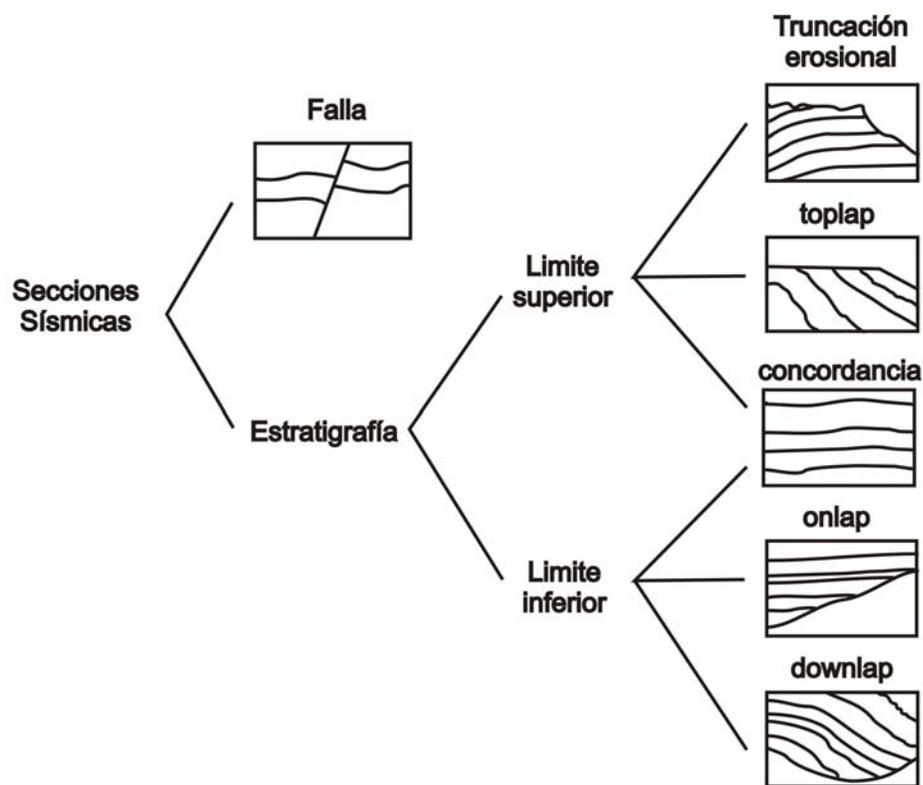


Figura 23. Clasificación de terminación de capas observadas en secciones sísmicas. Las terminaciones estratigráficas son los componentes fundamentales de la sísmica estratigráfica utilizando datos de sísmica 2D.

La resolución vertical  $R_v$  para los datos sísmicos esta dada por:

$$R_v = \frac{V}{N \cdot \Delta f} \quad (1)$$

Donde:  $N = 4$  para datos de alta calidad y  $N = 2$  para datos ruidosos

$V$  = Velocidad de intervalo

$\Delta f = f_{\max} - f_{\min} =$  Rango de frecuencias

Tabla II. Valores de resolución vertical.

V (m/s)	F (hz)	$R_v = \frac{V}{4f} = \frac{\lambda}{4}(m)$
2000	50	10
3000	40	19
4000	30	33
5000	20	62.5

La longitud de onda esta dada por:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2)$$

Donde: V= Velocidad de intervalo  
f= Frecuencia

Así que se han seguido los reflectores en donde se tienen amplitudes fuertes y coherencia lateral, tal y como el que se muestra en la Figura 24.

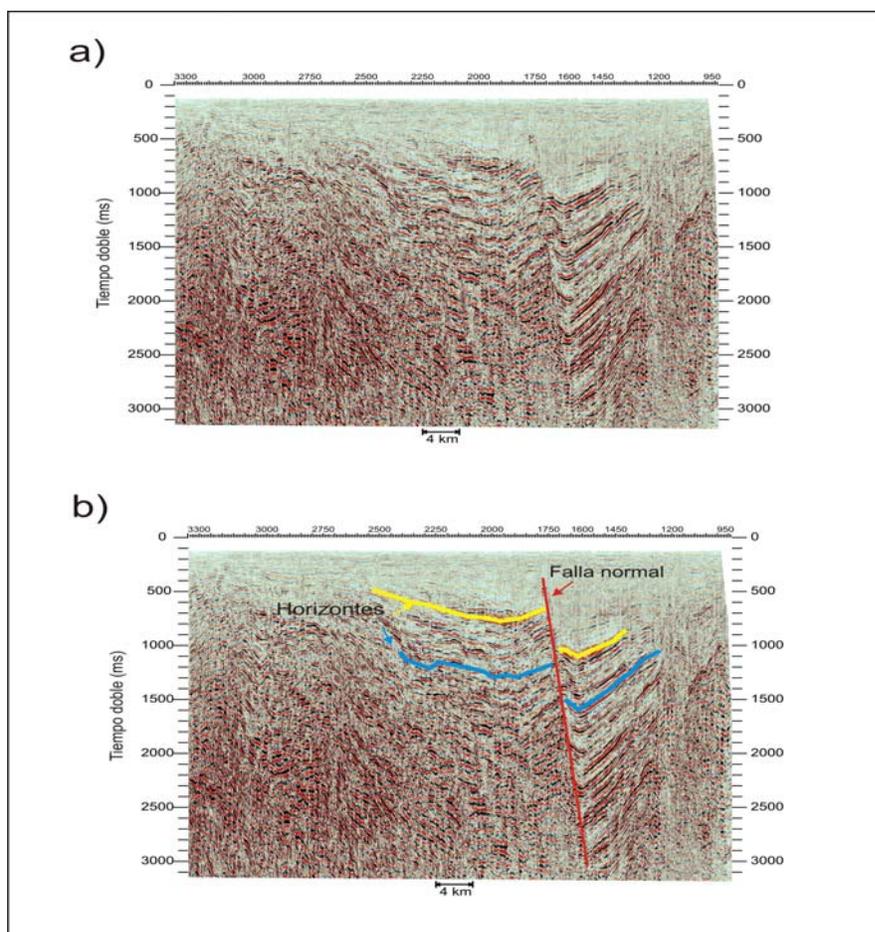


Figura 24. a) y b), sección sísmica sin y con interpretación típica de una sección: fallas y horizontes sísmicos.

### III. 2 Características generales en las secciones sísmicas

En esta sección se realiza una descripción general de las características en las líneas sísmicas en función de su geometría; líneas NE-SW que son transversales; NNW-SSE longitudinales y oblicuas, respecto a la forma geográfica del norte del Golfo.

Unos de los rasgos estructurales más notorios de la información procesada es la cantidad de fallas geológicas. Muchas de estas estructuras (~400 fallas) se presentan en

zonas no trabajadas con anterioridad y por lo mismo no se conoce cuál es su papel tectónico en el marco regional, por ejemplo, la región al *oeste* del área de estudio. La densidad del fallamiento estimado en las secciones es un promedio del número de fallas que contiene una sección. Se obtuvo haciendo un conteo de todo el fallamiento a lo largo de las secciones sísmicas y se normalizó con la longitud de la misma. Estas estructuras se presentan con cierto arreglo subparalelo de fallas normales (entre ellas) con ángulos de echado mayor a  $40^{\circ}$  y con un promedio de 1 falla por kilómetro. La complejidad estructural del área se puede observar en la mayoría de las secciones. En general, muchas de las estructuras no se manifiestan superficialmente en el piso oceánico ya que están sepultadas por los sedimentos. Se observa que, salvo las estructuras más prominentes, la mayoría de las fallas no perturban los estratos más profundos, y que a tiempos mayores a  $\sim 4$  s de tiempo doble (TD) de viaje las imágenes sísmicas no presentan una buena definición.

### **III. 2.1 Secciones sísmicas NE-SW**

Estas secciones atraviesan transversalmente la parte *norte* del Golfo de California y son: 5009, 5011, 5013, 5015, 5017, 5019, 5021, 5023, 5025 y 5027 (Figura 10). La longitud de las secciones es variada debido a que la información de algunas de ellas era incompleta, además el espaciamiento entre ellas no es equidistante. Las secciones 5009, 5011 y 5013, se encuentran en la parte más al norte del golfo teniendo una longitud de  $\sim 24$ , 41 y 26 km y un espaciamiento de 5 km entre ellas. Se detectó una gran cantidad de fallas, algunas de las cuales están localizadas *oeste* de la región de estudio y son reportadas por primera vez (Figura 25). En esta figura se observa una caída de los horizontes

sismoestratigráficos hacia la parte *este*, en donde se localiza la zona de falla de Cerro Prieto.

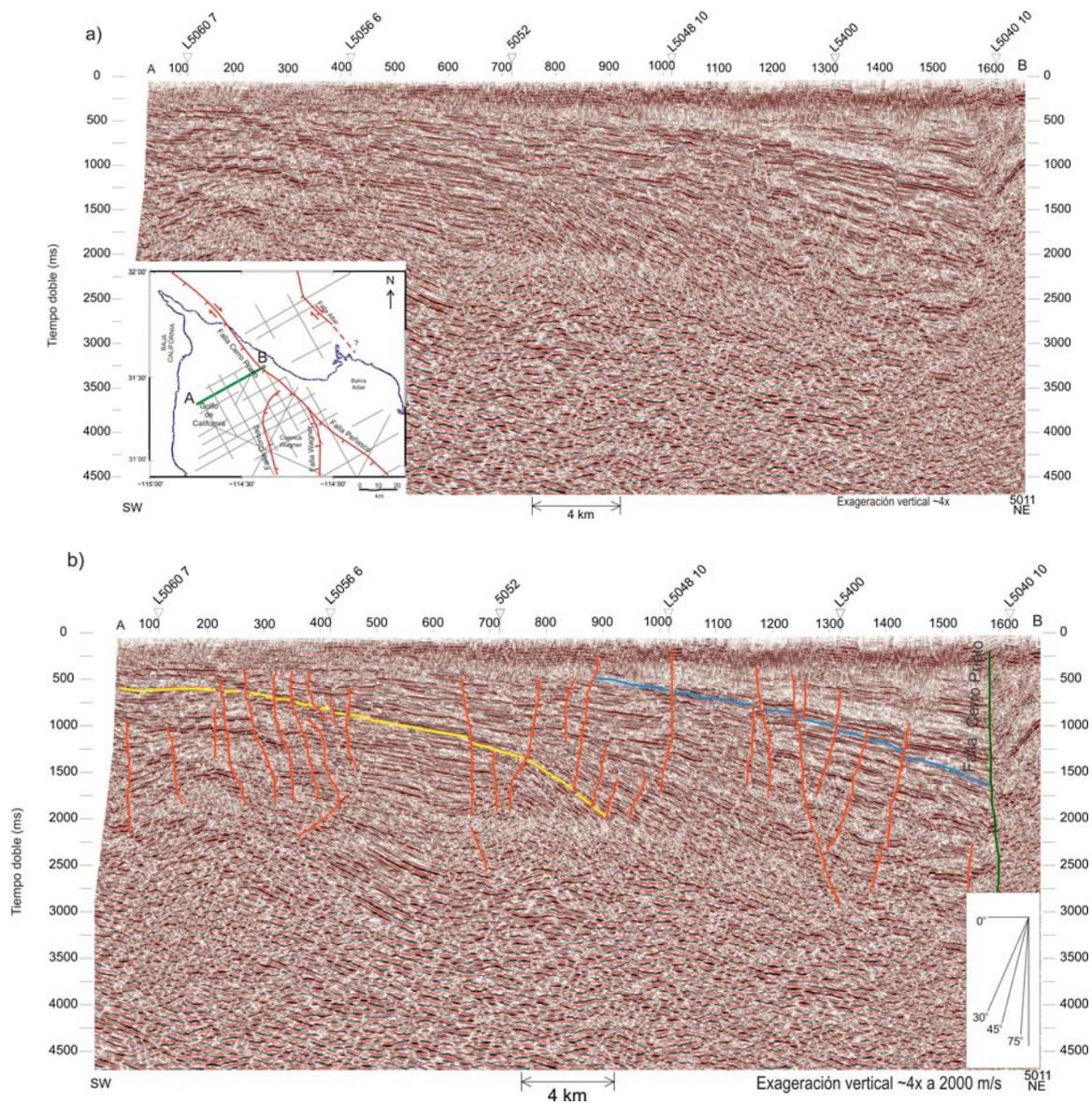


Figura 25. Sección sísmica 5011 a) sin interpretar; b) interpretada. Se observa como la mayoría de las fallas no cortan los depósitos en la parte superior y tampoco perturban los reflectores más profundos. La línea en color verde representa la Falla Cerro Prieto. Al *oeste* de la línea se tiene una cantidad significativa de fallas. Las líneas azules y amarillas son dos sismoreflectores. En el recuadro de la izquierda la línea negra A-B muestra la localización de la sección sísmica y del lado derecho se presenta los ángulos de inclinación para las fallas.

La figura 26, muestra la sección 5017 localizada al *oeste* de la parte central del área de estudio, en la región conocida como El Chinero. Una de las características es la cantidad de fallas en forma semiparalela y que al parecer no cortan los sedimentos más superficiales. Las estructuras aparentan no ser tan complicadas como las que se observan al *este* del área de estudio, donde se concentra la mayor cantidad de actividad tectónica.

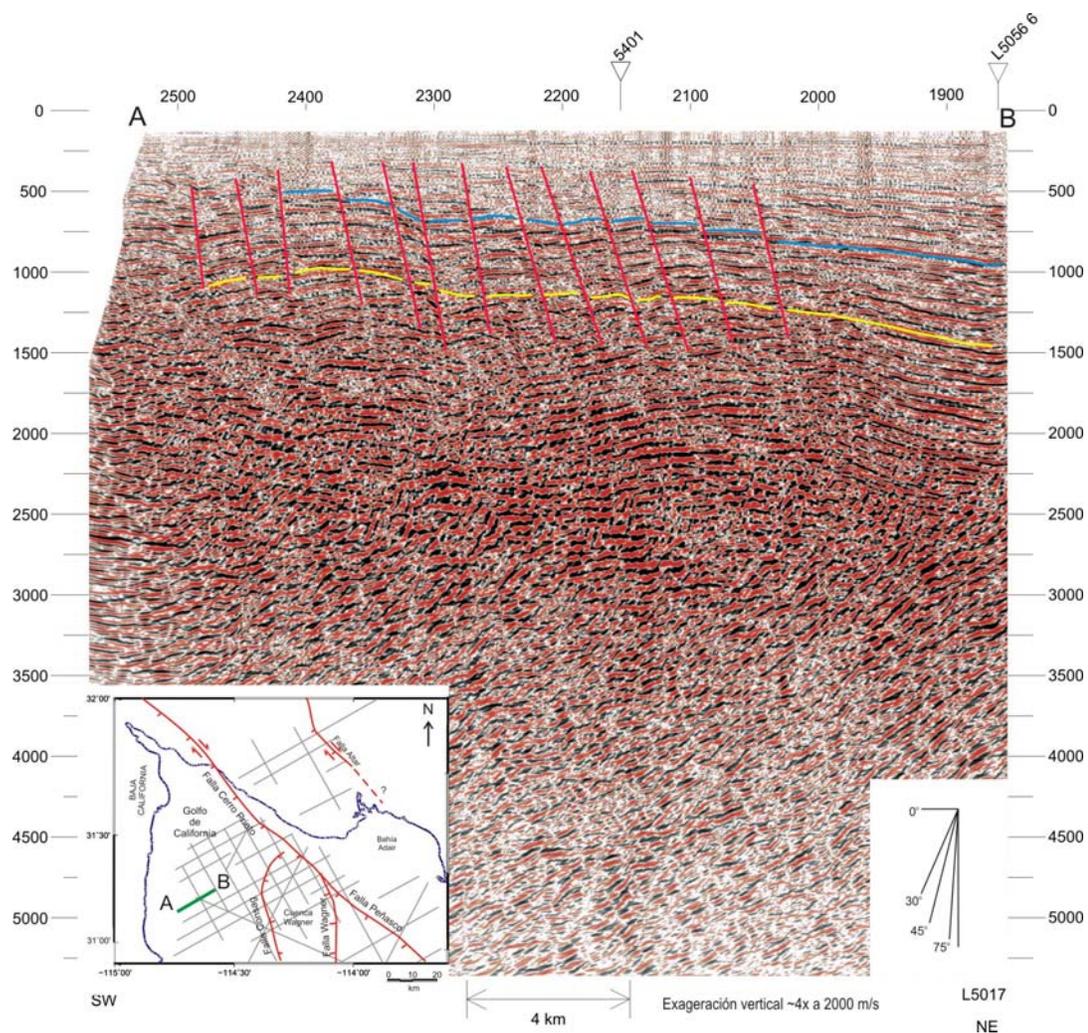


Figura 26. Sección 5017, localizado en el sector *oeste* de la región. Se tiene una serie de fallas semiparalelas y los reflectores no se observan muy deformados, siendo característico de ambientes de abanico.

Las secciones 5019, 5021, 5023, 5025 y 5027 tienen longitudes de ~59, 71, 66, 16 y 50 km y se localizan en la parte *sur* del área. Éstas muestran la estructura *norte* de la Cuenca Wagner y las fallas que la delimitan (Figuras 27 y 34). Las secciones 5021 y 5023 muestran un reflector en la parte *oeste*, teniendo una profundidad mínima de ~0.5 s de TD y se pierde hacia el *este*. Este reflector es interpretado como basamento acústico por la amplitud que presenta (Figura 27). Llama la atención el gran paquete de sedimentos presentes en la Cuenca Wagner los cuales están ligeramente basculados al *oeste*, además su deformación es casi nula, por lo que se puede decir que la subsidencia es en este sector de la cuenca.

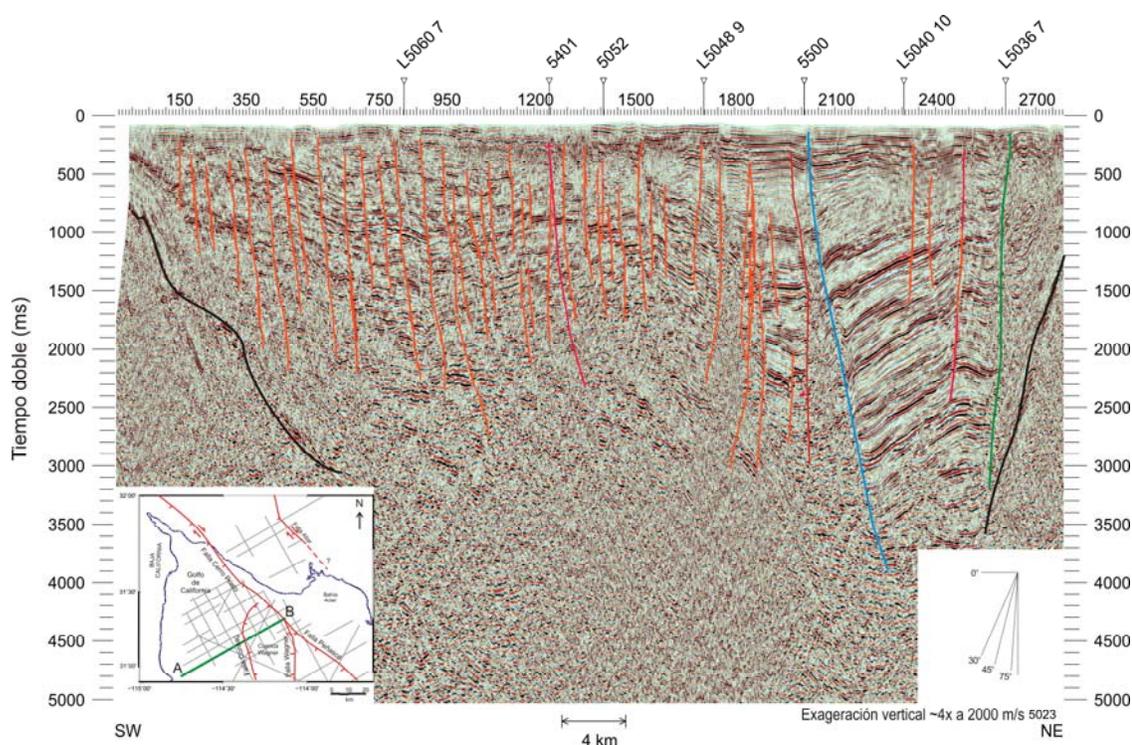


Figura 27. Sección 5023 localizada en la región más al *sur* del área de estudio. Se observa claramente la Cuenca Wagner limitado por fallas (sector derecho de la figura). Algo muy característico es que dentro de la cuenca se tienen un paquete de reflectores de 5 km de largo por 5 km de profundo sin que muestren gran deformación. También se observa que la mayor subsidencia de la cuenca se localiza al *oeste*. La línea negra representa el basamento acústico.

### III. 2.2 Secciones sísmicas NNW-SSE

Estas secciones, cortan longitudinalmente la zona *norte* del Golfo de California, (5060, 5056, 5052, 5048, 5048, 5044, 5040, 5036 y 5032) permitiendo visualizar las estructuras orientadas en dirección *norte* y *sur*. Están espaciadas aproximadamente a cada 7.5 km, con longitudes que van desde los 32 km hasta los 57 km.

Las secciones 5060, 5056 y 5052 tienen longitudes de ~35, 31 y 51 km y se localizan en la parte *oeste* del área de estudio. Las secciones 5056 y 5052 presentan horizontes sismoestratigráfico que se pueden seguir en la parte intermedia de estas secciones a una profundidad de ~0.8 s de TD (Figura 28). La sección 5052 presenta una zona difusa hacia la parte *sur*.

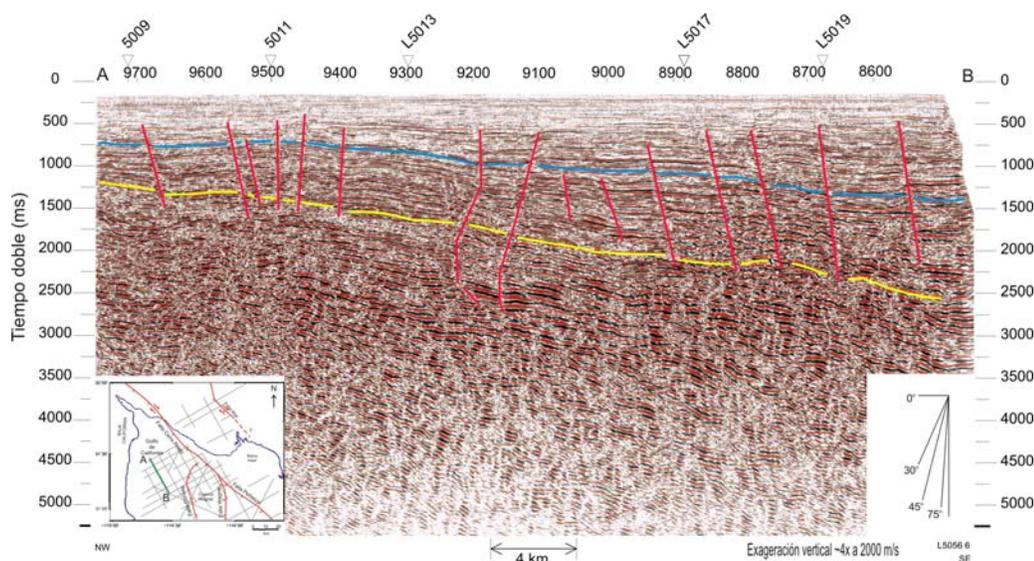


Figura 28. Sección 5056 en el sector *oeste* y de *norte-sur* mostrando de alguna forma las características a lo largo del abanico del río. Se observa como los reflectores se encuentran basculados hacia el sur y son más gruesos. Esta línea presenta rasgos similares a lo mostrado en la Figura 25 que corresponde a una línea que corre perpendicularmente a la aquí mostrada.

La sección 5040, en su parte *norte* presenta una zona donde los reflectores son difíciles de seguir lateralmente y así como múltiples difracciones, las cuales son características en una zona de falla de rumbo (Figura 29). Esta sección presenta por primera vez la estructura que delimita en su parte *noroeste* la Cuenca Wagner, aquí nombrada informalmente falla Consag.

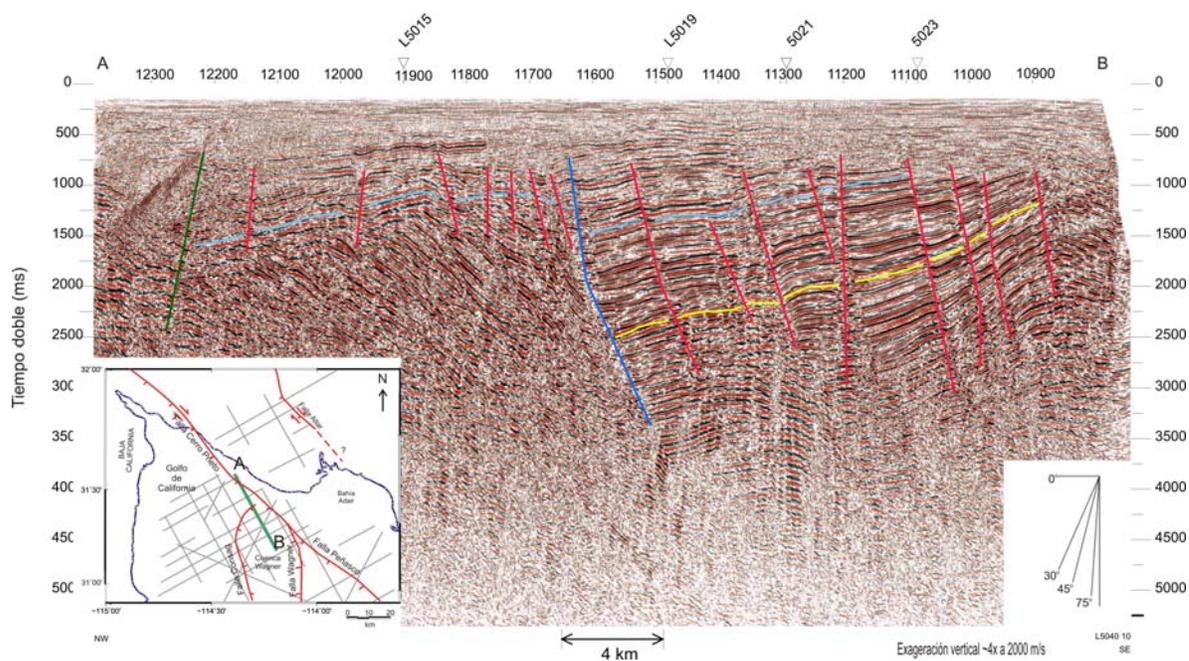


Figura 29. Perfil que corta la Cuenca Wagner de *norte* a *sur* (5040). Se observa claramente el límite norte de la cuenca (falla con línea azul en la figura), así como la subsidencia es mayor hacia dicha falla. Esta estructura se le ha asignado el nombre de Falla Consag.

### III.2.3 Secciones oblicuas

Son aquellas orientadas oblicuamente a la región de estudio, en este caso son solo tres: 5400, 5401 y 5500. La Figura 30 muestra la 5400, la cual tiene una longitud de ~21 km, orientación N26°E, que corta de frente el delta del Río Colorado. Se observa que en la porción oriental de la sección 5400, la secuencia de reflectores no está muy deformada, y no se observan muchas fallas, sin embargo en la parte central existe gran fallamiento, y cae suavemente hacia la zona de falla de Cerro Prieto. Algunas de estas fallas pudieran ser sinsedimentarias, lo cual es común en ambientes deltaicos, pero podrían también derivar de la influencia de la falla Cerro Prieto.

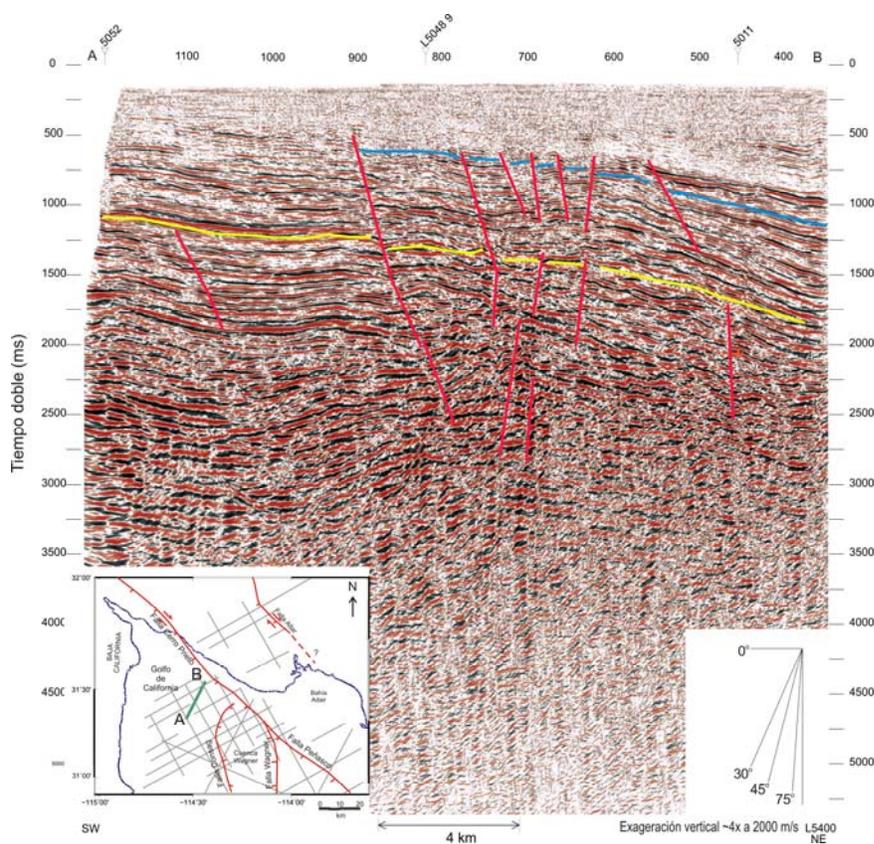


Figura 30. Perfil que corta la región de una manera oblicua. Se observa las características del abanico del río, presentándose una ligera pendiente hacia la región de la falla Cerro Prieto.

### **III. 3 Correlación de Fallas y Horizontes**

#### **III.3.1 Fallas**

Una vez identificadas las estructuras geológicas como son las fallas así como las secuencias sismoestratigráficas en cada una de las secciones, se estableció la correlación de estructuras entre secciones vecinas en las cuales se observaron rasgos estructurales y estratigráficos similares. Para un mejor control en la correlación es necesario tomar como referencia las tendencias de las fallas dominantes. Sin embargo, hay instancias en donde resulta difícil establecer los patrones de dirección, tanto de fallas como de horizontes. Tal es el caso que se muestra en la figura 31, que en algunas situaciones la correlación entre secciones es difícil. En la región de estudio existe entre algunas secciones mucha distancia o simplemente hay sectores donde no se cubrió o contó con información lo que también dificulta la correlación. En algunas situaciones, una falla puede tener un carácter reconocible (similar morfología, cantidad de echado, etc.) entre secciones. En otros casos, especialmente donde las fallas son numerosas, para establecer la correlación de la continuidad de las estructuras se hace usando tendencias establecidas cercanas o a niveles más profundos en la sección donde la relación es clara.

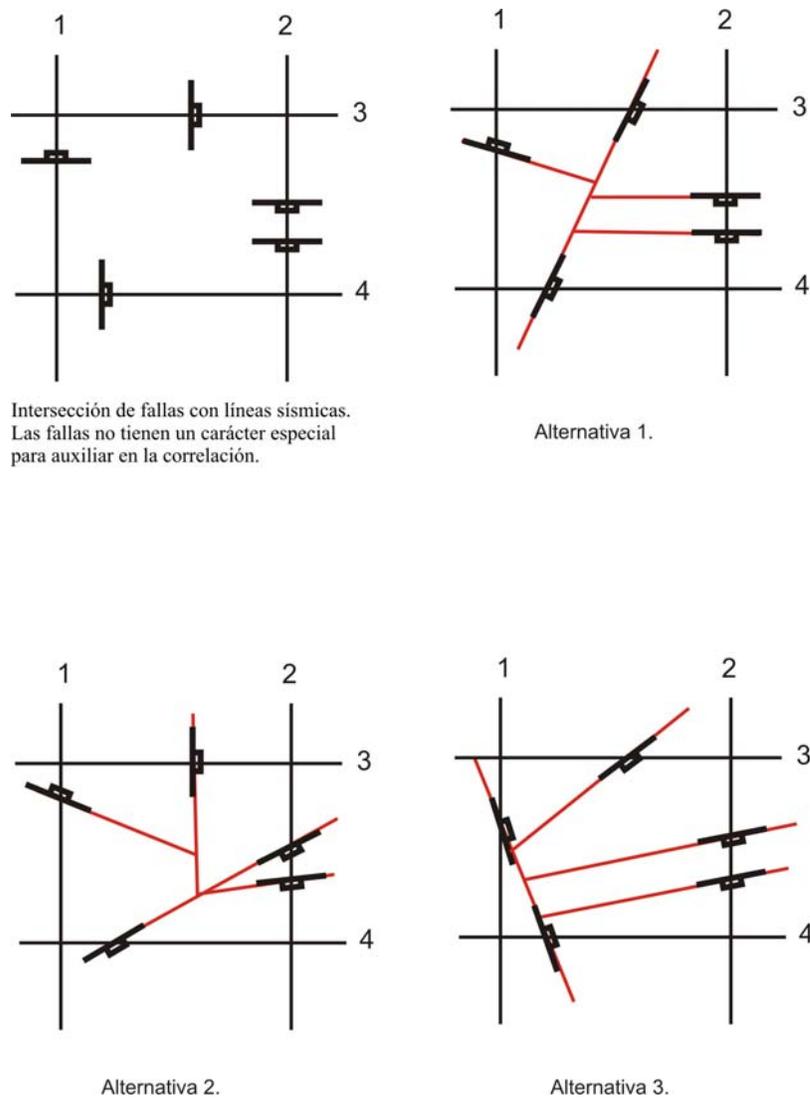


Figura 31. Dilema en la interpretación ¿cual patrón de fallas es el correcto? Cinco fallas interceptan las cuatro líneas sísmicas. Las fallas no tienen alguna característica especial que nos ayude a su correlación. Se muestran tres de muchas posibles interpretaciones.

Una técnica para tratar de superar en algunos casos la situación mencionada anteriormente es el de realizar despliegues en forma de “zig-zag”, como el que se muestra en la Figura 32.

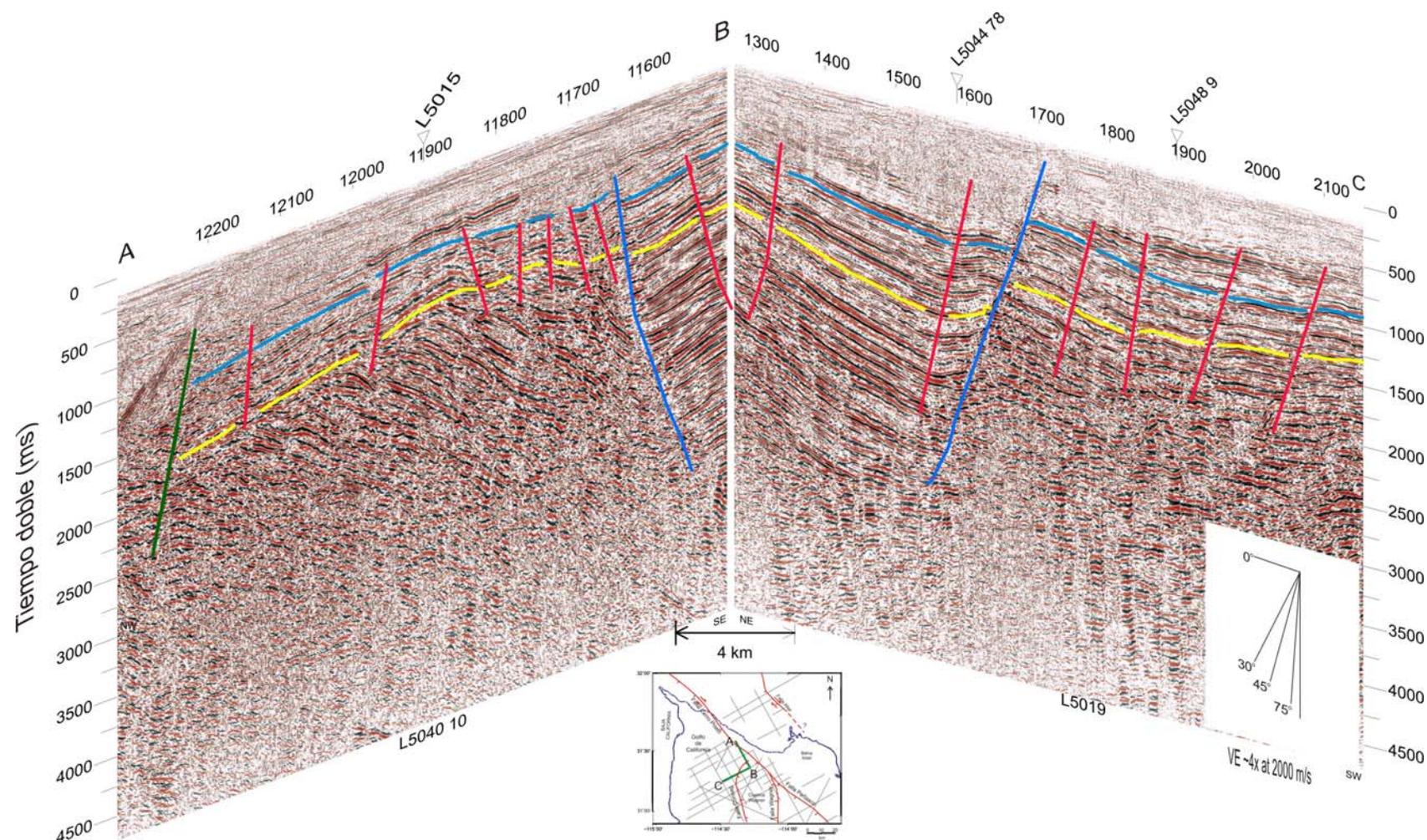
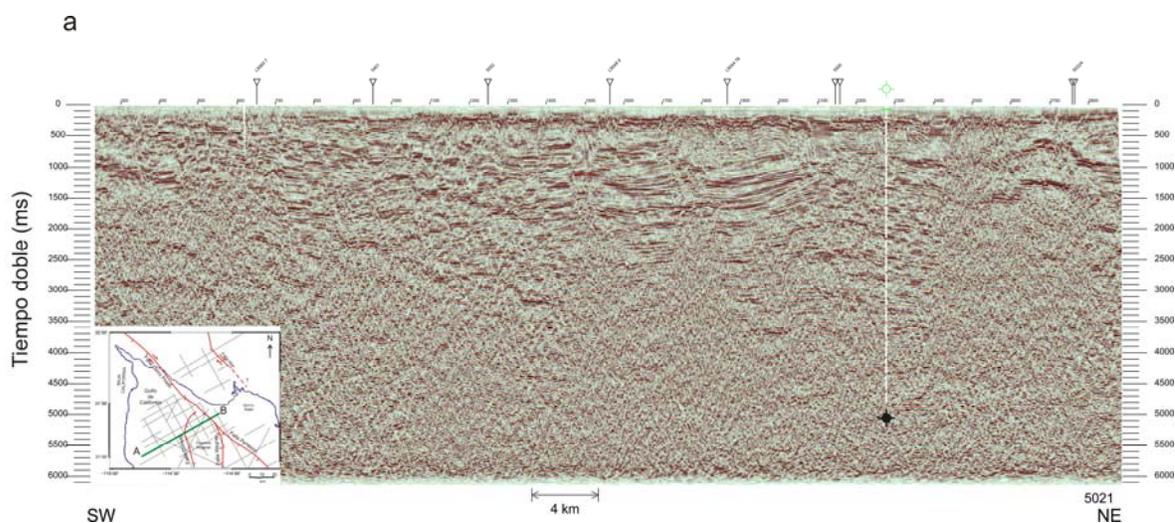


Figura 32. Secciones sísmicas en zig-zag. En la figura inferior se muestra la localización y el trazo de éste. La línea azul marino corresponde a la misma estructura en los dos sectores, en este caso la Falla Consag. Los horizontes en cada uno de los sectores es el mismo para ambas.

### III.3.2 Horizontes

La interpretación sobre las secciones permitió definir horizontes sismoestratigráficos. El procedimiento consistió en seleccionar cada reflector por sección y correlacionarlo con las vecinas. La nomenclatura utilizada para designar a los horizontes sísmicos corresponde a las siglas LS que significa límite de secuencia.

A partir de la sección 5021 y utilizando los horizontes reportados por González *et al.*, (2006) se eligieron dos de estos, los cuales marcan los límites de secuencias; LS-3 y LS-4 (Figura 33). Dentro de la Cuenca Wagner se observan una serie de reflectores que al tratar de correlacionarlos con reflectores fuera de la cuenca resulta difícil realizarlo, razón por la que solo se seleccionaron dos, los cuales se configuraron en casi todo el área de estudio.



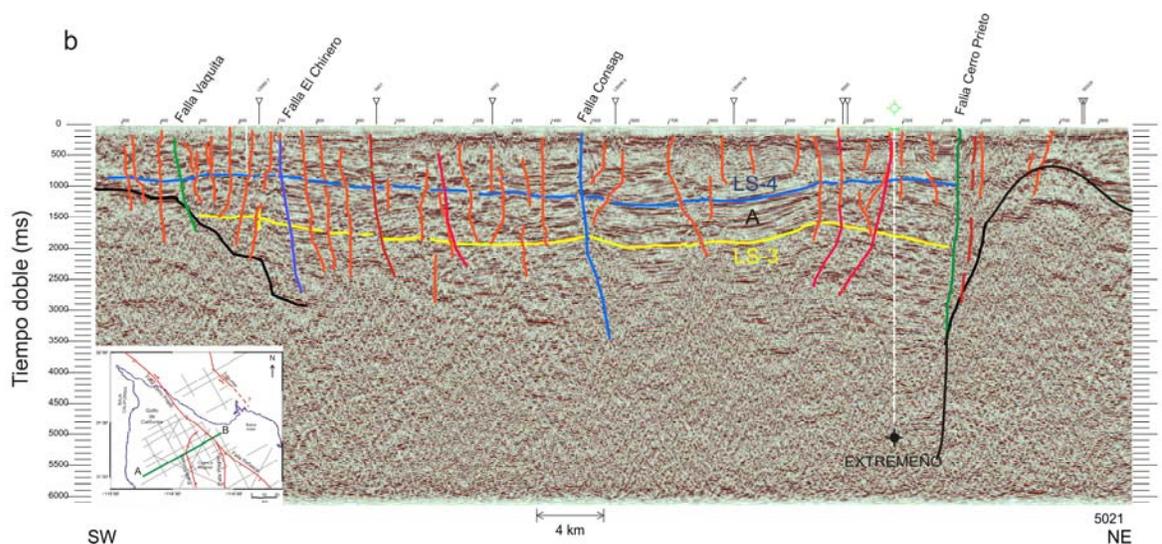


Figura 33. Sección 5021 y pozo (Martín-Barajas *et al.*, 2006) en el que se interpretaron los horizontes, algunas fallas y la unidad depositacional A. El color azul representa el horizonte LS-4 y el color amarillo el LS-3. Línea negra representa el basamento acústico.

## IV RESULTADOS

### IV.1 Estructuras interpretadas

En esta sección se describen las estructuras resultado de la interpretación, mismas que se muestran en la Figura 34. El orden con el cual se describe a las estructuras inicia con las fallas y es de *este a oeste* de la región, seguido el basamento acústico y finalmente con los horizontes sísmicos. Es importante mencionar que en cada una de las secciones se observa una gran cantidad de fallas, pero el tratar de correlacionarlas con sus vecinas resulta complicado y poco confiable debido a la separación que existe entre éstas. Las fallas reconocidas en las secciones y que no fueron posibles identificarlas con otras, quedan registradas en la base de datos para trabajos posteriores.

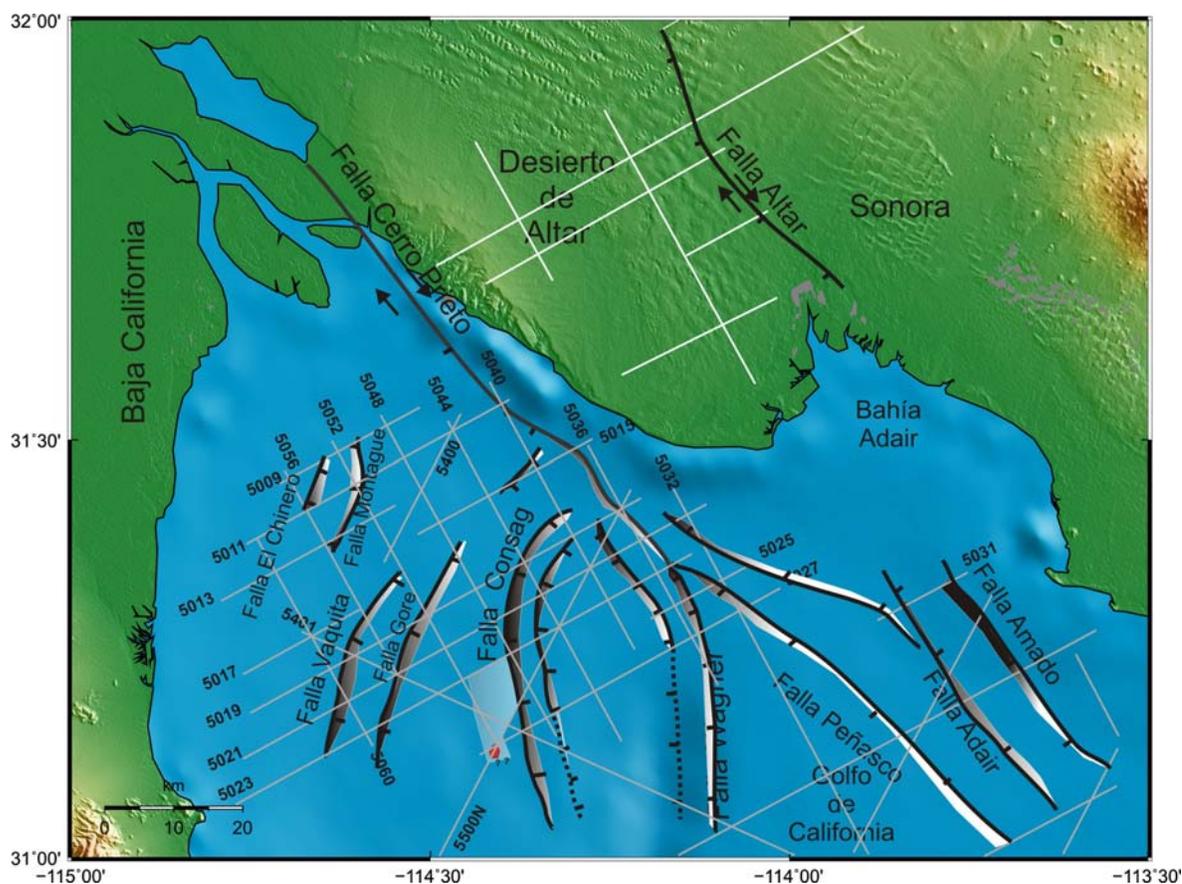


Figura 34. Principales estructuras interpretadas en la región. Punto rojo = Roca Consag. RC = La zona gris (RC) representa el área de influencia de Roca Consag. Lo achurado indica sentido y magnitud de caída de falla. Líneas rectas blancas en desierto de Altar corresponden a las secciones sísmicas interpretadas por Pérez-Tinajero (2007). Algunas estructuras no se les han asignado nombre.

#### IV.1.1 Falla Cerro Prieto

Una de las principales estructuras cartografiadas es la falla Cerro Prieto que se extiende desde la región del valle de Mexicali en dirección al golfo con un rumbo  $N43^{\circ}W$  y echado de  $\sim 85^{\circ}$  al oeste, cruza las secciones sísmicas 5023, 5036, 5021, 5019, 5015, 5040 y 5011 (Figura 34). El límite SE está conectado con las fallas Wagner y Peñasco en la línea 5023 (González *et al.*, 2006). En el área de estudio se extiende a lo largo de  $\sim 32$  km. Es

una falla de rumbo lateral derecha (Pacheco *et al.*, 2006), lo cual es evidenciado por los reflectores difusos que no presentan continuidad lateral ubicados en el margen oriental de la falla.

#### **IV.1.2 Falla Wagner**

La falla Wagner es considerada por sus características, como otra de las principales estructuras en la región y se localiza al *este* y marca el límite de la Cuenca Wagner con una longitud de ~ 38 km en el área de estudio (Figura 34). El trazo de la falla tiene una orientación N10°W y un echado de 55° hacia el *oeste* con desplazamiento de reflectores de hasta 1 km a través de la zona de falla, la cual es lítrica. La terminación de los estratos hacia la falla es en forma discordante hacia arriba (onlap), es decir, los reflectores tienen a comprimirse hacia arriba a lo largo del plano de la falla. La falla Wagner intersecta con la de Cerro Prieto en un ángulo de 130° (Figura 34), por lo que el depocentro de la Cuenca Wagner dobla al NW adyacente a la zona de falla de Cerro Prieto, a partir de las líneas 5027 y 5025.

#### **IV.1.3 Falla Consag**

La falla Consag (nombre informal) se localiza al *oeste* de la falla Wagner (Figura 34), y limita en dicho sector a la Cuenca Wagner. Es la primera vez que se reporta esta estructura. Hacia el *sur* del golfo esta estructura es casi paralela a la falla Wagner. Tiene un rumbo variable NE-SW y una longitud aproximada de ~100 km y un promedio de echado de 50° hacia el *este* y es de tipo normal. El segmento más al *norte* de la falla, se

curva a  $25^{\circ}$  e intersecta la zona de falla de Cerro Prieto en un ángulo de  $110^{\circ}$  (Figura 34). Asociada a esta estructura es en donde se observa la mayor subsidencia de la cuenca, siendo ésta de hasta  $\sim 300$  ms y presenta saltos de falla de  $\sim 400$  ms. (ver también Figuras 28 y 30).

#### **IV.1.4. Falla Gore**

Se localiza en la parte central de la región de estudio, tiene una longitud de  $\sim 36$  km, siendo la estructura más “grande” en dicho sector (Figura 34). Es una falla normal con echado hacia el *sureste*, reconocida en 7 líneas sísmicas. Tiene una orientación  $N23^{\circ}E$ , y un echado de  $\sim 63^{\circ}$  SE. Es importante recordar que en este sector no se había reportado estructuras en la literatura, siendo la primera vez que se tiene conocimiento al respecto y además no se observa actividad sísmica (Figura 41).

#### **IV.1.5 Falla Vaquita**

Es la falla observada más cercana a las costas de Baja California, con un rumbo de  $N20^{\circ}E$ , un ángulo echado de  $55^{\circ}$  con caída al SE y una longitud de  $\sim 26$  km, siendo interpretada en 6 líneas sísmicas (Figura 34). Corre relativamente paralela a la falla Gore.

#### **IV.1.6 Falla Montague**

Se localiza en el extremo norte de la zona de estudio (Figura 34). Se pudo observar a lo largo de 16 km, con caída al *noroeste*, y es antitética a la falla El Chinero. Se interpreto en 4 líneas sísmicas. Tiene una dirección de N12<sup>0</sup>E, y un promedio de echado de 55<sup>0</sup> al NE. Ésta, junto con la de El Chinero son las más al occidentales del Golfo de California.

#### **IV.1.7 Falla El Chinero**

Esta estructura se localiza en el extremo *norte* del área de estudio (Figura 34), siendo de tipo normal con caída hacia el oriente. Tiene un rumbo N11<sup>0</sup>E, con una distancia interpretada de ~8 km. Fue interpretada en dos líneas sísmicas. Se ubica en una zona donde no se observa actividad sísmica, por lo que pudiera ser una estructura sinsedimentaria formada por la compactación y peso de los sedimentos. Sin embargo considerando la complejidad de la zona, no se descarta la posibilidad de que sea de origen tectónico. Es de tipo lístrica y su antitética es la falla Montague.

#### **IV.1.8 Roca Consag**

La Roca Consag es una pequeña isla volcánica localizada al *oeste* de la Cuenca Wagner, cuya edad es menor a 1 Ma (Martín-Barajas y M. López, comunicación personal, 2007). En la interpretación se logró observar la influencia de dicho cuerpo en varias líneas sísmicas. El área resultó ser de ~ 36 km<sup>2</sup> dentro de lo que se ha podido configurar (Figura

34, 37). En las líneas más al *norte* no se observó su presencia y al *sur* no se cuenta con información sísmica que nos indique si esta continúa.

## **IV.2. Basamento acústico y Cuencas**

### **IV.2.1 Basamento Acústico**

En la figura 35 se muestra la geometría del basamento acústico en tiempo doble de viaje (TD), obtenido de la interpretación de las secciones sísmicas que se mostraron en la Figura 10. Se incluye información complementaria del desierto de Altar (Pérez-Tinajero, 2007), así como de la región de las costas de Sonora (González, *et al.*, 2006; Aragón-Arreola, 2007).

El reflector interpretado como basamento acústico es muy variable. En algunas líneas existen regiones en donde se identifica claramente; en otros sectores se pierde de manera abrupta y en otras, simplemente no se observa un reflector que sugiera la presencia de éste. Esta interpretación permite delimitar la Cuenca Wagner, en donde se infiere que el hypocentro yace a más  $\sim 6$  s en TD, ya que en ninguna línea dentro de la región de la cuenca se observa basamento. Hacia el *norte*, la Cuenca Wagner está limitada por un alto estructural controlado por la falla Cerro Prieto y al *este-sureste* por la falla Wagner. Para la configuración no se considero una pequeña región que corresponde a Roca Consag, de la cual se comentará más adelante. En la parte *oriental* de las fallas Cerro Prieto y Wagner, se encontró a una profundidad entre 700 y 1500 ms (TD) haciéndose más somero hacia el margen continental de Sonora. Hacia las costas de Baja California se observó a

profundidades mínimas de 1500 ms (TD), mientras que la parte central del *norte* del Golfo no se observa (Figura 35). En la región noroeste se tiene un reflector el cual es difícil de determinar si corresponde a basamento acústico o a un límite de secuencia. Para solucionar este problema se verificó la velocidad del reflector dudoso la cual fue de 3 km/s, esta velocidad no corresponde a basamento acústico y se comparó con la del basamento localizado en la zona oriental de la falla Cerro Prieto, llegando a la conclusión que el reflector no es basamento acústico.

Al comparar el reflector de la sección 5060 con el de la 5056, la cual es vecina y paralela (Figura 28) da más certeza de que el reflector en cuestión no es debido a basamento, ya que en la sección se observa una secuencia de sedimento a mayor profundidad.

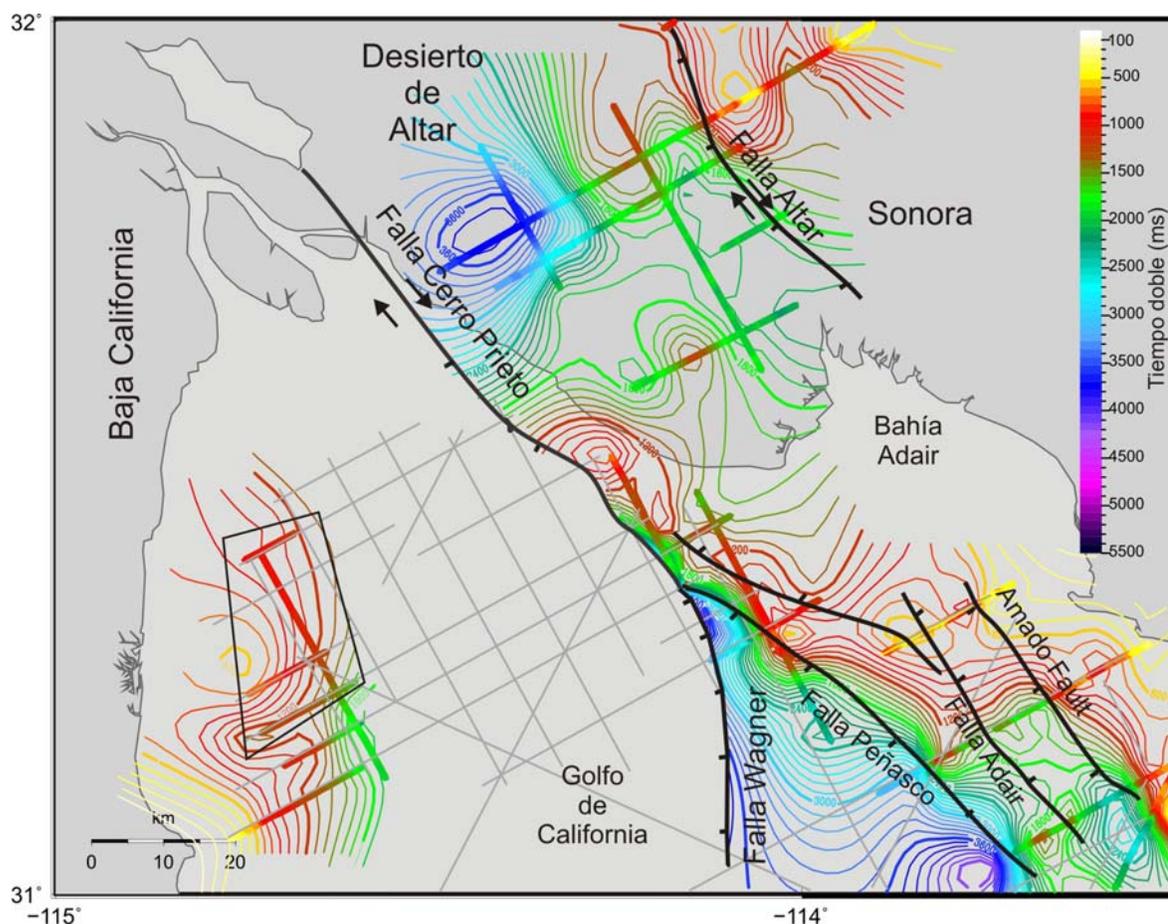


Figura 35. Basamento acústico en TD de viaje, derivado de las imágenes sísmicas. Se incluye información complementaria de la cuenca de Altar (Pérez-Tinajero, 2007) y de la Cuenca Adair (Aragón-Arreola, 2007; González, *et al.*, 2006). El recuadro representa la región en donde se tiene incertidumbre en si es basamento o un límite de secuencia. Los colores marcados, corresponden a las regiones en donde fue interpretado el basamento.

#### IV.2.1 Cuenca Wagner

La correlación de las estructuras permitió definir la zona norte de la Cuenca Wagner. El área configurada es de 1285 km<sup>2</sup> y un perímetro de 152 km. La longitud de la frontera de la cuenca a lo largo de la falla Cerro Prieto es de 18 km, en Consag de 68 km y en Wagner es de 42 km, respectivamente.

Este sector es una cuenca asimétrica delimitada en la parte oriental por las fallas Wagner y Cerro Prieto. La falla Wagner delimita la cuenca al *este* y *noreste*, interceptándose a la de Cerro Prieto con un ángulo de  $130^{\circ}$ . La cuenca tiene un deflexión hacia al *noroeste* adyacente a la zona de falla Cerro Prieto (Figura 36). El límite *oeste* de la cuenca o depocentro esta contiguo a la falla Consag, la cual se extiende por más de 100 km en una dirección N-S con un echado de  $\sim 50^{\circ}$  al E. El segmento más al *norte* de la falla Consag se reorienta  $25^{\circ}$  e intersecta a la zona de falla Cerro Prieto en un ángulo de  $110^{\circ}$  (Figura 34). A lo largo de la cuenca se observaron dos depresiones muy marcadas; la primera ubicada en la porción norte entre las fallas Consag-Cerro Prieto- Wagner, esta depresión presenta profundidades mayores a los 5 s (TD) es decir,  $\sim 6$  km de profundidad y muestra una forma relativamente circular en la parte más profunda. La segunda es de menor dimensión y presenta una forma ligeramente circular (Figura 36). Una parte del sector más al sur de la configuración de la Cuenca, fue reportado por Persaud *et al.*, (2003), y se observa en la figura 36.

La Cuenca continúa hacia el *sur*, conectándose con la Cuenca Consag, como se puede observar auxiliándonos de la sección 5037 (Figura 36) (González *et al.*, 2006). El largo de la cuenca es de 60 km y el ancho de 26 km. Observando la tendencia en profundidad, se cree que el basamento acústico esta a un profundidades mayores de 7 km (Figura 34 y 36).

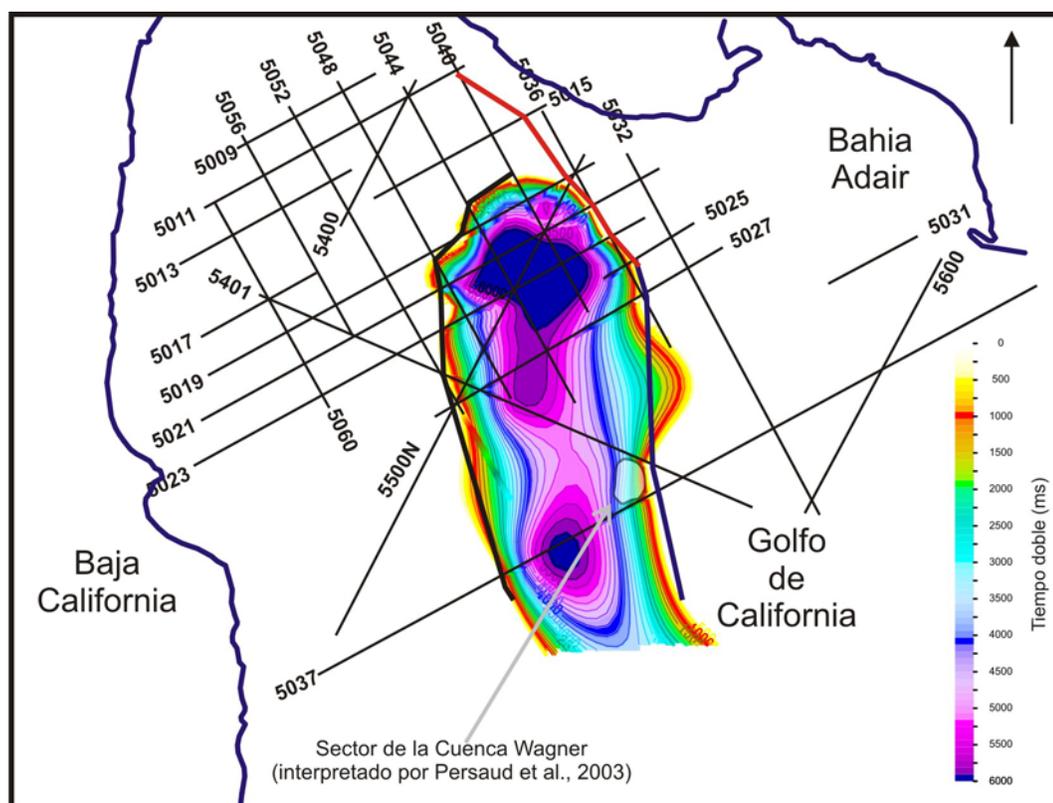


Figura 36. Configuración del depocentro de la Cuenca Wagner. Profundidad en tiempo doble (ms).

#### IV.2.2 Cuenca el Chinero

Un depocentro ubicado al *occidente* de la Cuenca Wagner se ha observado (Figura 37a), el cual se encuentra delimitado al *este* por la falla y Roca Consag y al *oeste* por la falla Gore, al cual se le llama informalmente Cuenca El Chinero. No se puede inferir si es una cuenca joven ya que no sabemos si los sedimentos recientes (del fondo marino) son cortados por fallas, debido a que la sísmica no presenta información en ese rango de profundidades. Se observa un aparente intrusión de lo que se considera Roca Consag, ya que tanto los reflectores sísmicos en la Cuenca Wagner como EL Chinero, son del tipo *onlap* (Figura 23), están curvados hacia arriba, lo cual es resultado de una sedimentación

seguida de la intrusión de la Roca Consag. De ser así, se deduce que tanto Cuenca Wagner como El Chinero, formaban una sola unidad que después fue separada por Roca Consag (Figura 37b). Hacia el *sur* se ignora si se extiende dicha cuenca, ya que no se cuenta con información sísmica y al *norte* no es muy claro en donde podría terminar.

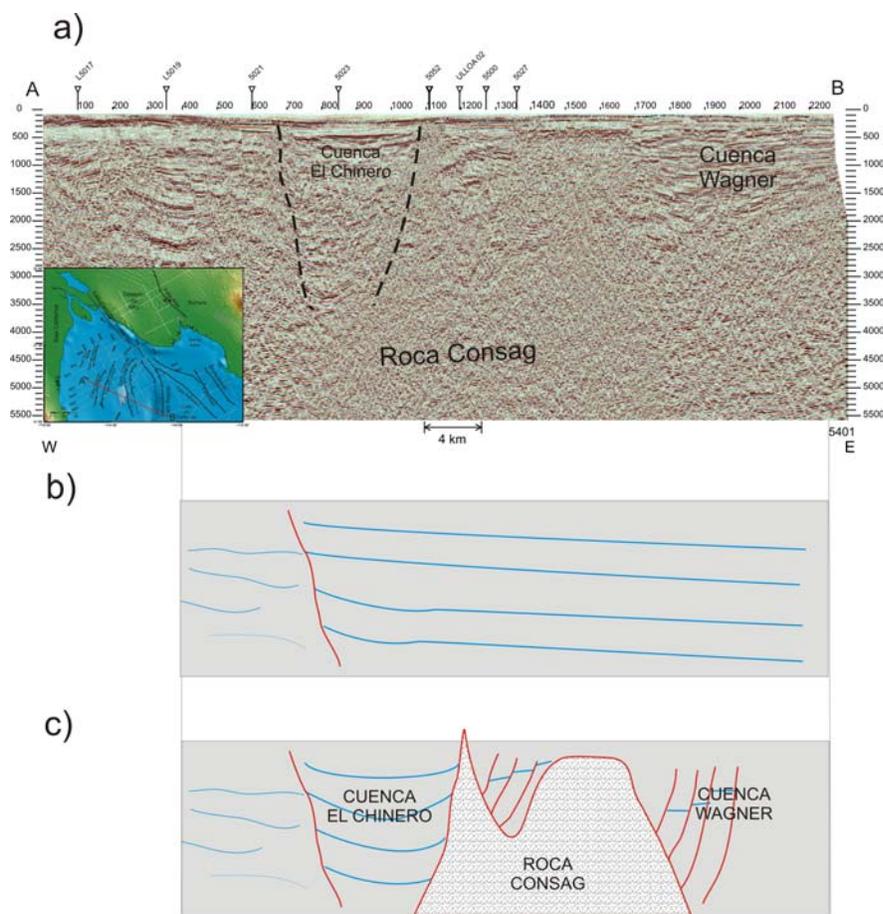


Figura 37. a. Sección sísmica 5401, mostrando las Cuencas El Chinero y Wagner, b. modelo teórico considerando que EL Chinero y Wagner forman una solo unidad y c. Intrusión de Roca Consag después de que se ha depositado los sedimentos de EL Chinero y Wagner. En rojo fallas y en azul reflectores sísmicos. Observe la deflexión hacia arriba de los reflectores en las cuencas respecto a la roca Consag, lo que puede estar indicando que primeramente se dio la depositación y después intrusiono Roca Consag.

### IV.2.3 Horizontes sísmicos

En la Figura 38 se muestra el horizonte LS-3, el cual presenta grandes amplitudes y un tiempo doble (TD) de registro de 1952 ms en su parte más profunda en la sección 5021 (Figura 33). Este horizonte, aunque presentó una geometría irregular, se logró correlacionar en casi toda el área de estudio, excepto en la porción oriental de la Cuenca Wagner ya que presenta un cierre con la falla Cerro Prieto. En algunas secciones, por ejemplo; en la 5048, fue imposible seguirlo hacia el extremo *sur* de ésta ya que presenta una zona difusa donde los reflectores no tienen coherencia lateral. Este horizonte corresponde al inicio de un cambio hacia un ambiente de depositación ubicado en la zona transicional.

La configuración de las isócronas de tiempo del horizonte indica que éste es más somero hacia el NW (Figura 38). También indica que la depositación fue a lo largo de la zona de falla Cerro Prieto, para posteriormente presentarse bordeando la falla Wagner en el sector de la cuenca del mismo nombre, flexionándose ligeramente al *sur* hacia la falla Consag, donde se presenta la mayor subsidencia. En general, partiendo del *noroeste*, en donde se localiza una de la región más somera, hacia el centro de la cuenca se observa una caída en esa dirección, para después hacerse menos profundo hacia el *sureste*. De lo anterior se infiere que la dirección del transporte fue a lo largo del flanco de la falla Cerro Prieto y después fue depositado dentro de la Cuenca Wagner, indicando la dirección de corriente de los sedimentos del Río Colorado.

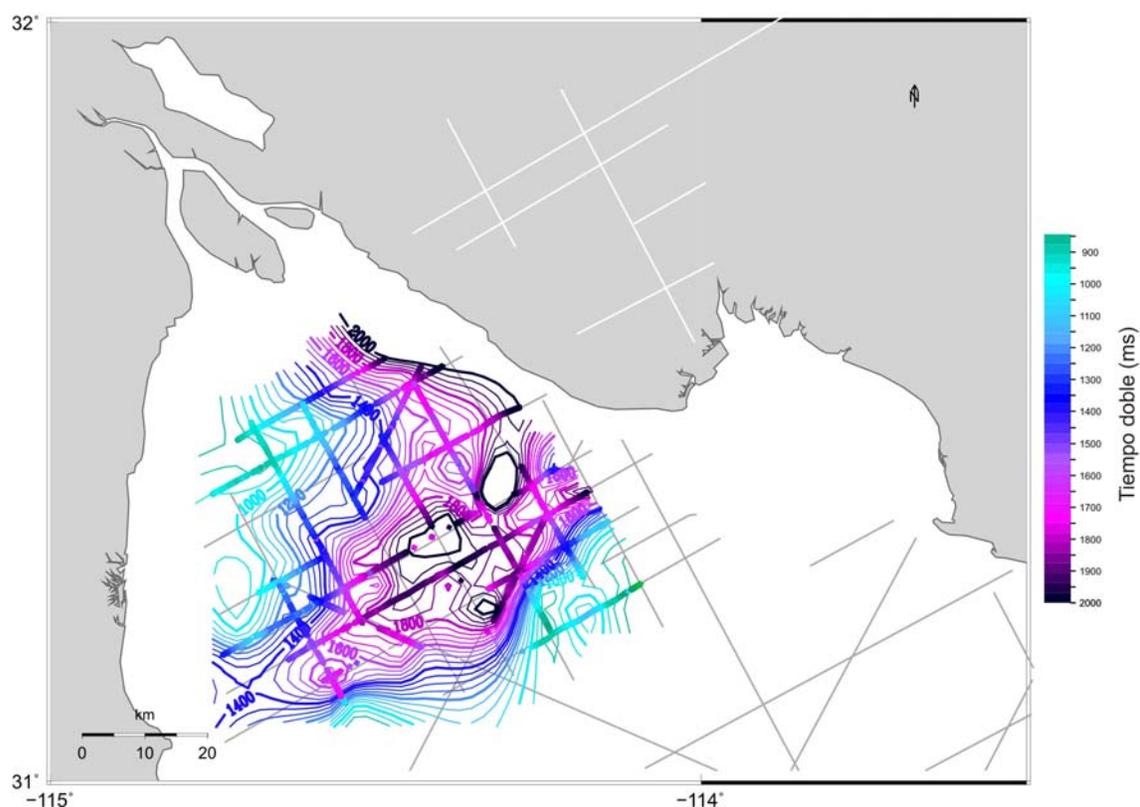


Figura 38. Mapa de isócronas de tiempo correspondiente al horizonte LS-3. Las zonas achuradas de color sobre las líneas representan los lugares dónde se interpretó el horizonte.

El horizonte LS-4, mostrado en la Figura 39, es un reflector que también presenta una gran amplitud y un tiempo máximo de registro de 1350 ms en la sección 5021 (Figura 34), en su parte más profunda; es más somero que el horizonte LS-3. Al igual que el horizonte LS-3 el LS-4 presenta un cierre contra la falla Cerro Prieto que pone en contacto este reflector con el basamento acústico. El LS-4 se ve afectado principalmente por fallas subparalelas de tipo normal. Las partes más profundas muestran una tendencia a lo largo de la falla Consag, lo cual refleja el control de la subsidencia ejercida por dicha estructura. La

parte más somera de este reflector se localiza al *oeste-noroeste* del área de estudio, así como en su sector *este*.

De acuerdo a González *et al.*, (2006), en el horizonte LS-4 subyace un grueso paquete de sedimentos del Plioceno (5.3 – 1.8 Ma), depositados en ambiente transicional dominado por los sedimentos transportados por el Río Colorado. La configuración del horizonte LS-4 indica que este horizonte es más somero hacia el NW del área de estudio. Mientras sus partes más profundas se localizan en el depocentro y al NE de la Cuenca Wagner (Figura 39). La dirección de depositación es algo similar al horizonte LS-3, es decir, a lo largo del flanco de la falla Cerro Prieto, para después distribuirse dentro de la cuenca Wagner.

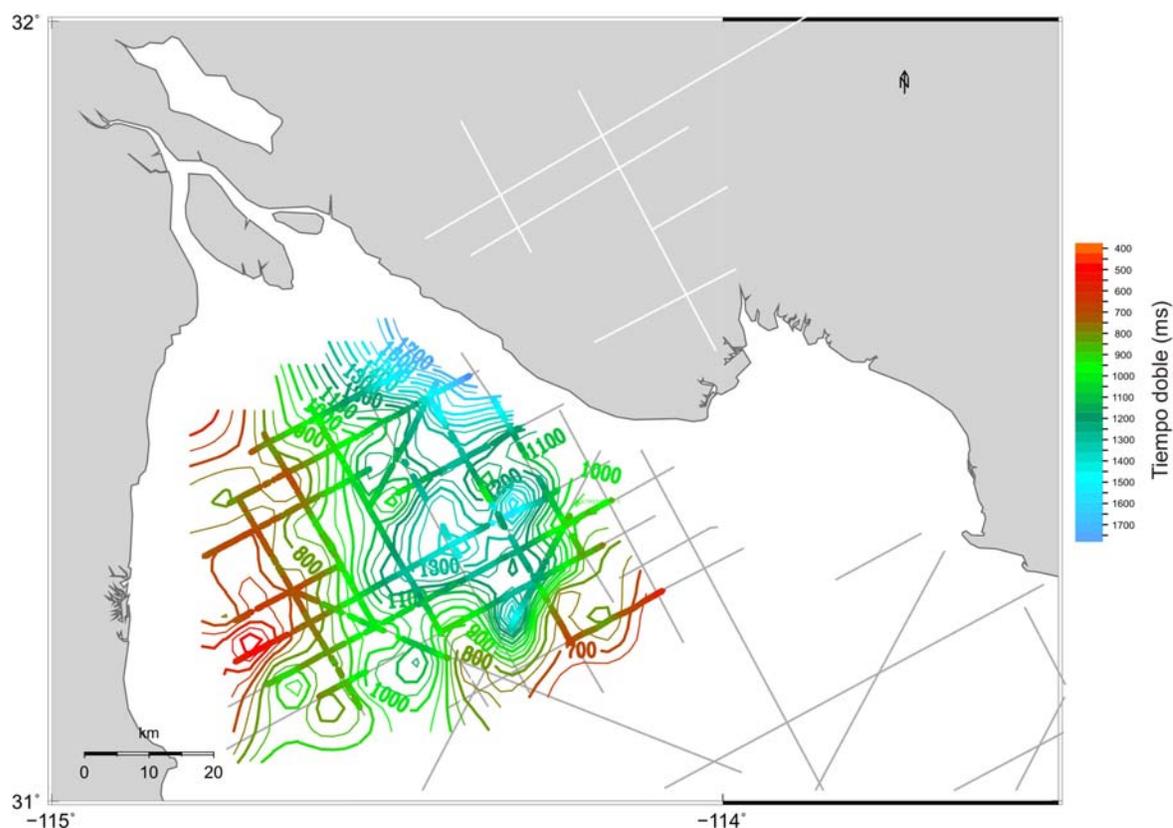


Figura 39. Mapa de la configuración de las isóneas de tiempo correspondiente al horizonte LS-4. Las zonas achuradas de color sobre las líneas indican los lugares dónde se interpretó el horizonte.

Mediante la diferencia de los tiempos del horizonte LS-3 y LS-4 se obtuvo el espesor en tiempo de un paquete de sedimentos al que se ha denominado unidad A (Figura 40). Esta unidad tiene un grosor máximo de 880 ms de TD. La unidad A está constituida por sedimentos depositados en un ambiente variable: de transicional a nerítico interno (González *et al.*, 2006). Se observa como la parte más gruesa del paquete es perpendicular a la desembocadura del río, y coinciden con las Cuencas Wagner y El Chinero.

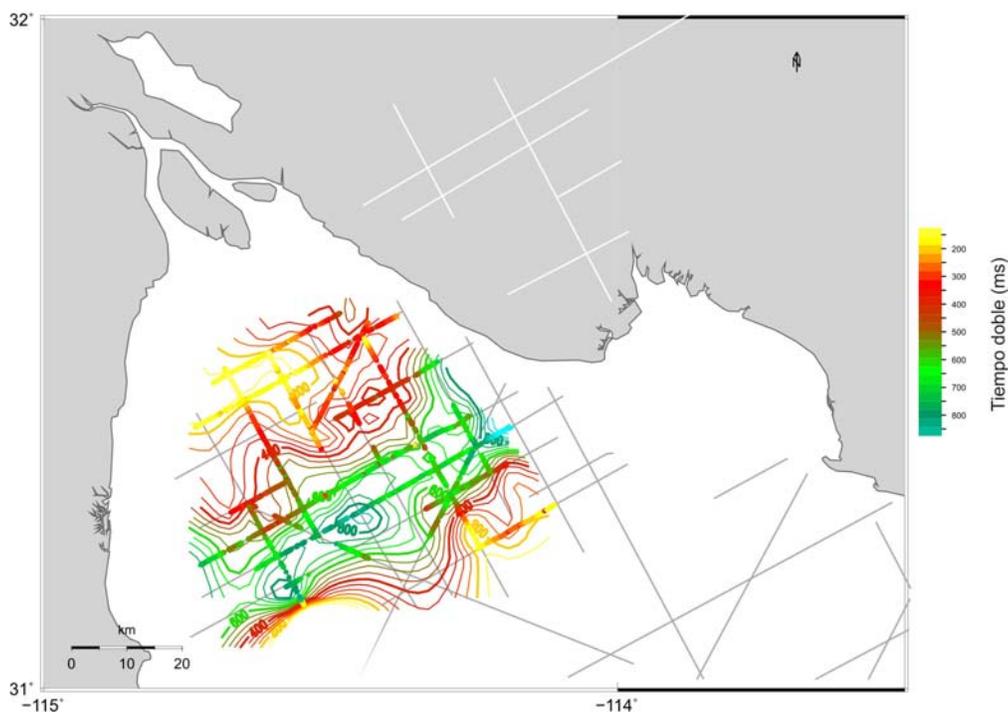


Figura 40. Mapa de isopacas en tiempo correspondientes a la unida A. Las regiones marcadas en color sobre las líneas sísmicas representan los sitios donde se calculó el espesor en tiempo del horizonte.

Finalmente, se obtuvo que los horizontes dentro de la Cuenca Wagner no son muy complicados correlacionarlos entre secciones sísmicas, pero al tratar de proyectarlos fuera de dicha Cuenca, se complica, por lo que solo se correlacionaron dos horizontes. Respecto a las edades, las partes más profundas de la cuenca deben ser mayores al Mioceno Medio (23 – 5 Ma), de acuerdo a Martín-Barajas, *et al.*, (2006), para pozos de hasta 5500 metros de profundidad dentro de la cuenca y no cortan basamento.

## **V. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON OTROS DATOS GEOFÍSICOS**

### **V.1. Sismicidad**

Con el propósito de mostrar la tectónica activa y ver si existe relación entre la actividad sísmica y las estructuras reportadas en el presente trabajo, se recurrió a los catálogos de datos sísmicos para la región de estudio proveniente de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM) y que comprende el periodo de 1976-2007; así mismo se consultaron los catálogos de Southern California Earthquake Data Center (SCEDC), USGS-Earthquake Center, Preliminar Determination Epicenter (PDE), entre otros. Ya que no se observaron diferencias significativas entre los epicentros de la información consultada, se decidió utilizar la base de RESNOM, por ser la fuente más confiable en virtud de la magnitud de los eventos de la región y la distancia de las estaciones sísmicas.

La Figura 41 muestra los epicentros, los cuales se localizan principalmente al oeste de la falla Cerro Prieto y en la región de la falla Consag. El total de eventos extraídos de la base de datos son 144 y oscilan entre las magnitudes 1.7 y 4.4, encontrándose algunos eventos sin magnitud. La mayoría de las profundidades de los eventos reportados en el catalogo son mayores a los 30 km, por lo que se decidió no mostrar un perfil de éstas. Lo anterior es en virtud de que se considera que la corteza en esta zona no debería ser tan profunda y además, algunos de los hipocentros tienen errores significativos en sus localizaciones. La actividad sísmica es relativamente baja en comparación de lo que ocurre en el Valle de Mexicali, región al norte de la zona de estudio. En la misma Figura 41, en círculos rojos se incluyen los epicentros reportados por Thatcher

y Brune (1971), para un enjambre sísmico ocurrido en la zona en Marzo de 1969. Estos investigadores reportaron alrededor de 70 eventos con magnitudes entre 4 y 5.5, ocurridos alrededor de 2 semanas. No reportan hipocentros, pero argumentan que están por debajo de los 40 km. EL mecanismo focal reportado para uno de los eventos fuertes (estrella en la Figura 41) es de falla normal, con azimut  $5^{\circ}$  y echado de  $70^{\circ}$  con caída el *este*. Esta información y tomando en cuenta el lugar del epicentro, podría estar correlacionado con la falla Consag.

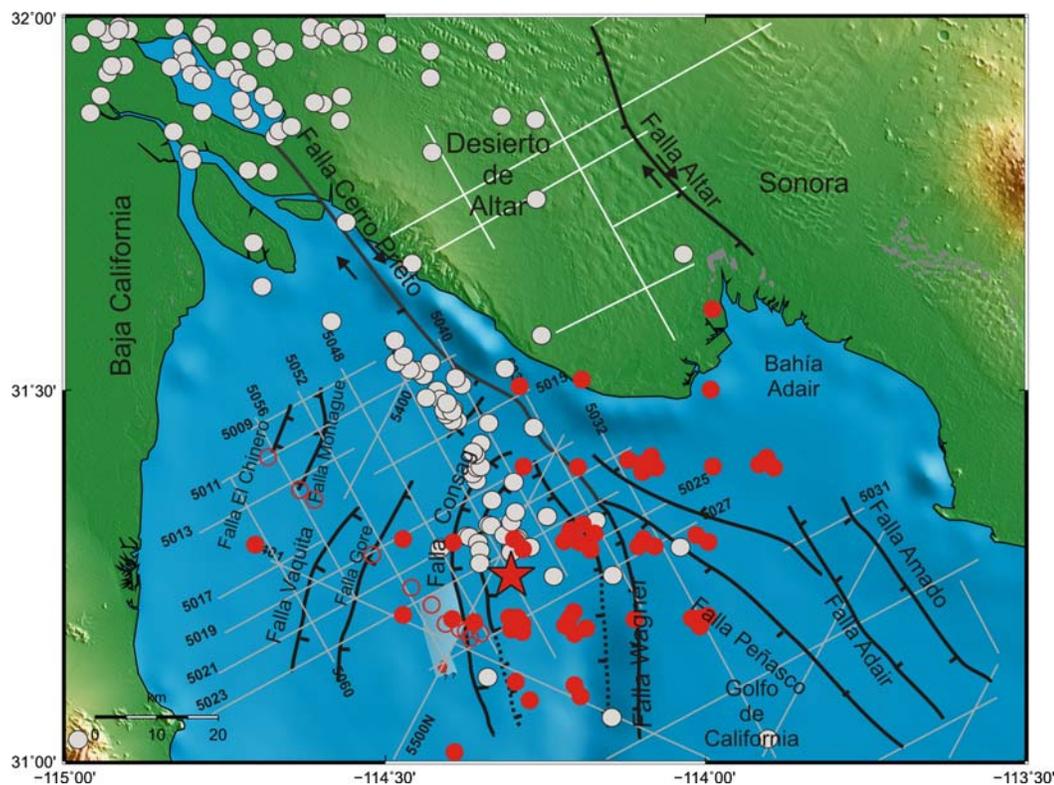


Figura 41. Actividad sísmica tomada de la base de datos de RESNOM, para el periodo 1979-2007 (círculos blancos). En rojo, enjambre sísmico reportado por Thatcher y Brune (1971).

## V.2. Gravimetría y Magnetometría.

Los resultados obtenidos de la interpretación de las líneas sísmicas de reflexión, son comparados con mapa de anomalía gravimétrica y magnetométrica reportados por García-Abdesalem (2006) y Martín-Barajas *et al.*, (2006). La Figura 42 muestra la anomalía gravimétrica, en la cual se presentan valores de hasta -100 mGal. Dicho mínimo coincide con las máximas profundidades obtenidas en la interpretación sísmica (Figura 38), de la Cuenca Wagner. Se observa como la concentración de los gradientes son a lo largo de un sector de la falla Cerro Prieto y *norte* de la falla Wagner. En los valores de las anomalías gravimétricas hacia el *norte* no se observa alguna estructura, pero sin embargo coincide con la tendencia de las máximas profundidades con el Horizonte LS-4 (Figura 39). Hacia el *oeste* del área de estudio las anomalías gravimétricas tienden a ser menos negativa, indicando la existencia de basamento acústico, tal y como se observa en el sector *noreste* de las fallas Cerro Prieto y Peñasco. El mapa de anomalía se considera esta muy filtrada lo cual hace que alguna tendencia local no se observe.

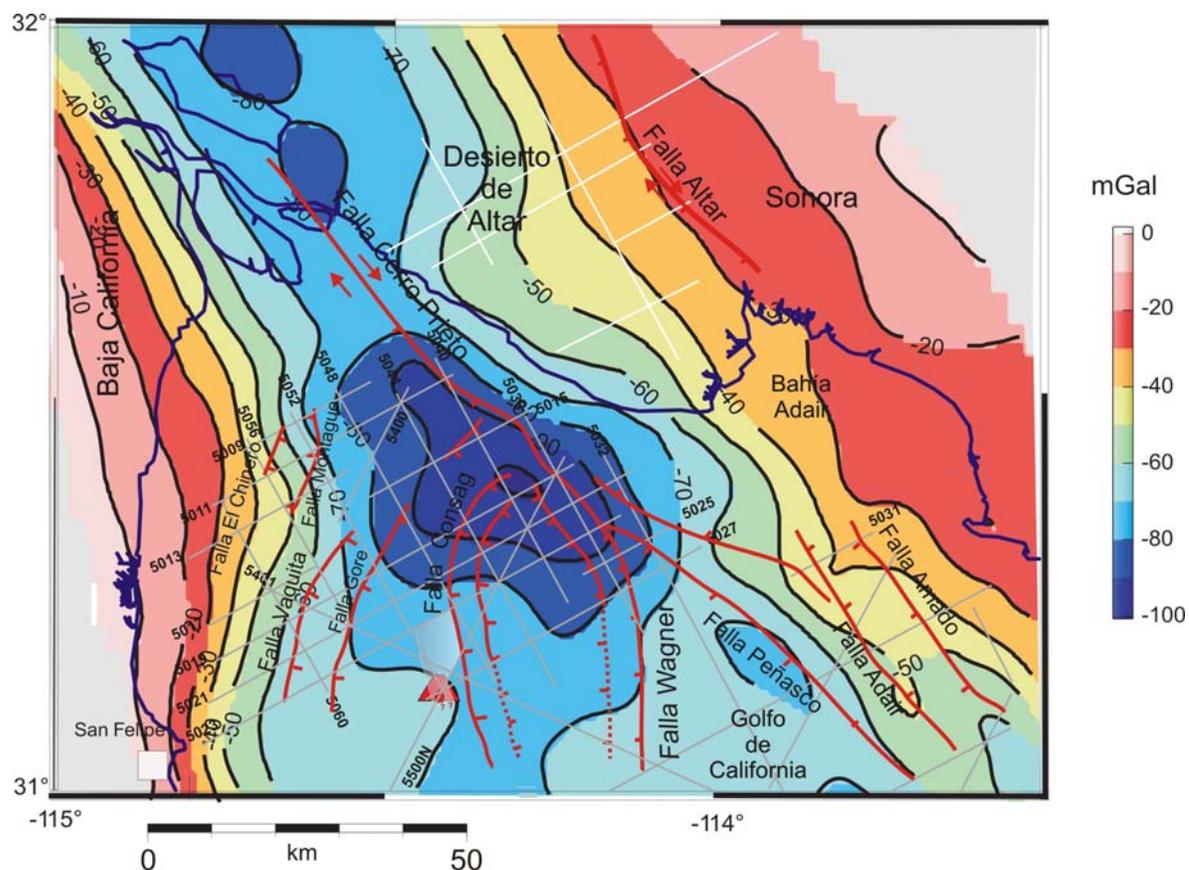
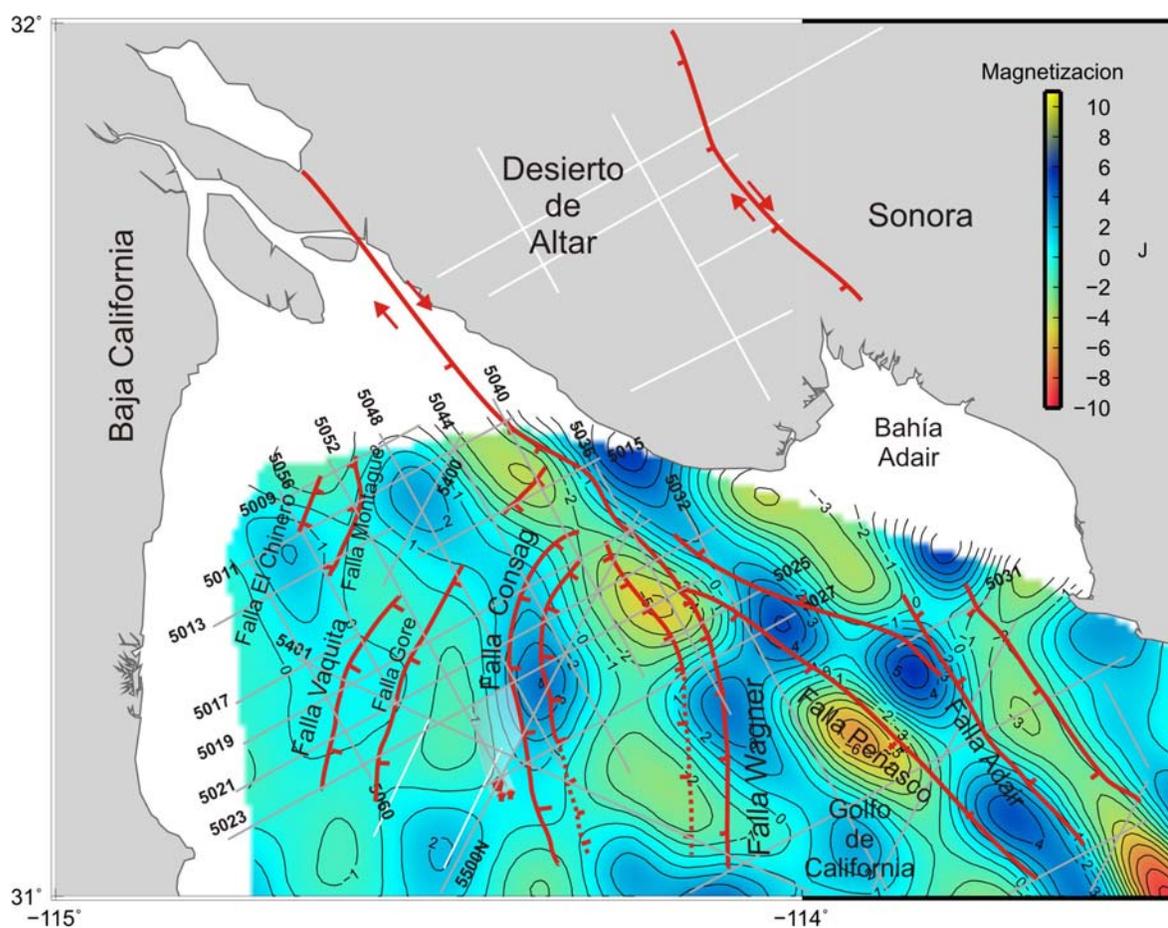


Figura 42. Mapa de anomalía de gravedad residual con contornos a cada 10 mGal. Las fallas se muestran en color rojo (modificado de García-Abdesalem, 2006; Martín-Barajas *et al.*, 2006).

La Figura 43 muestra la anomalía magnética y se observa un mínimo para la parte más profunda de la Cuenca Wagner. Se observa una tendencia al *sur* para después flexionarse hacia el *sureste*, este rasgo es comparable a la tendencia que se tiene de la configuración de la Cuenca Wagner (Figura 36). Para la anomalía localizada al *noreste* de Roca Consag (RC), no se observa una clara correlación con los resultados de la sismica. No se descarta la posibilidad de que sea la influencia del cuerpo volcánico de la Roca Consag, el cual posiblemente este más profundo que el rango de resolución de la sismica y por esta razón no se observó. Las anomalías hacia el *oeste* no son muy claras, pero

observando los máximos, podemos decir que la tendencia es noreste-suroeste teniendo una pequeña correlación con las estructuras ahí reportadas. Respecto a la anomalía observada al este de la falla Montague, se ignora que pudiera ser, ya que las secciones sísmicas en ese sector no muestran algo singular.



## **VI. DISCUSIÓN**

En base a la interpretación de las secciones sísmicas en este capítulo se discutirán las principales estructuras en el Norte del Golfo de California.

### **VI.1 Falla Cerro Prieto**

La falla Cerro Prieto es una de las principales estructuras en el norte del Golfo de California y dentro de la Provincia del Salton Sea que distribuyen el movimiento de las placas Norteamérica y Pacífico. Esta falla es de tipo dextral; se extiende a lo largo de 80 km desde el centro de dispersión Cerro Prieto hasta la Cuenca Wagner (Cruz-Castillo, 2002). El trazo de la falla es visible únicamente en su sector sur y su continuidad hacia el norte ha sido determinada por mecanismos focales y métodos geofísicos (Frez y González, 1991; Suárez, 1999; Pacheco, 2006). La porción sur del trazo de esta falla es visible desde el lugar conocido como mesa de Andrade, a través de los humedales de Santa Clara y en la costa noroccidental de Sonora en donde introduce en el Golfo de California más allá de la Cuenca Wagner. De acuerdo con nuestros resultados, esta falla se localiza en las secciones sísmicas por una zona difusas de reflexiones (zona de trituración) (Figura 25).

Esta falla se conecta en su parte sur con las fallas Wagner y Consag las cuales forman parte de los límites norte y sur de la cuenca e inducen deformación al norte del Golfo. La continuación del trazo de esta falla hacia la parte más al sur del Golfo esta relaciona a la falla Peñasco y presenta además una menor actividad sísmica comparada con la actividad de la zona norte.

No se cuentan con líneas sísmicas en la porción terrestre que permitan seguir cartografiando el trazo de la falla hacia el norte. Sin embargo, en el estudio realizado por Pacheco *et al.*, (2006) y basados en gravimetría y magnetometría indican la presencia de una estructura principal en el margen occidental de la Cuenca Altar, esta estructura está relacionada con la falla Cerro Prieto. La interpretación de las secciones sísmicas ha confirmado su presencia en el norte del Golfo de California y permitieron definir el rumbo de su traza en esta zona.

## **VI.2 Cuenca Wagner**

¿Se puede considerar a la cuenca Wagner una cuenca pull apart?. Estas cuencas son aquellas que se ha generado por un campo de esfuerzos de cizalla; además, los modelos ideales predicen que los lados longitudinales de este tipo de cuencas están limitados por fallas de rumbo o fallas maestras, mientras las fallas transversas, se orientan en forma oblicua a las fallas de rumbo, estas son predominantemente fallas normales, tanto planares como listricas (Withjack *et al.*, 2002; Abraham, 1992; Gibbs, 1984).

Si se compara el modelo estructural obtenido a partir de la interpretación de secciones sísmica con un modelo ideal de una cuenca pull apart, se puede observar que la diferencia radica en que el modelo ideal cuenta con dos fallas de rumbo que controlan e inducen movimiento y deformación a la cuenca, mientras que en nuestro modelo estructural solo se tiene una falla maestra, la cual es la falla Cerro Prieto.

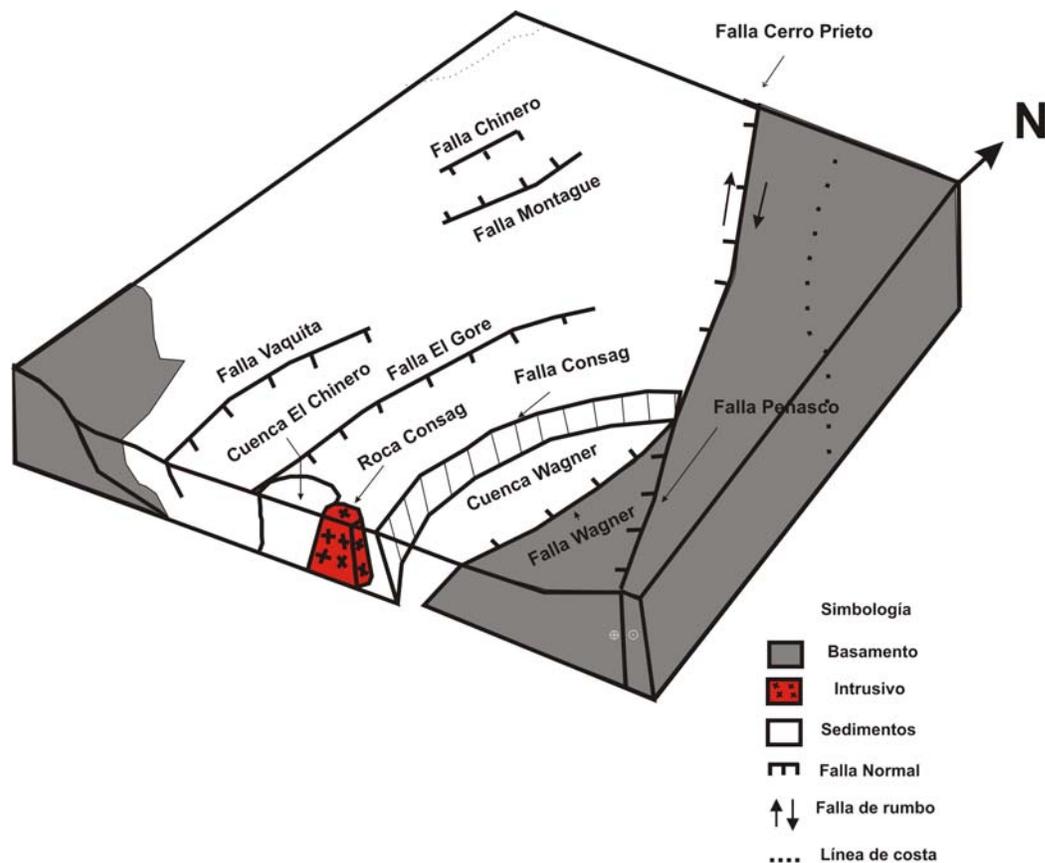


Figura 44. Modelo estructural de la región norte del Golfo de California. Muestra en forma esquemática los principales rasgos estructurales a nivel de basamento interpretados a partir de las secciones sísmicas. Las principales estructuras que delimitan la Cuenca Wagner son las fallas: Cerro Prieto, Wagner y Consag.

Considerando que tanto las fallas Consag y Wagner intersectan oblicuamente a la falla Cerro Prieto es posible que ambas fallas que son principalmente normales tengan componente lateral lo que genera un movimiento vertical oblicuo, en el cual domina el movimiento vertical sobre el horizontal. En cambio, si estas fallas fueran perpendiculares a Cerro Prieto la extensión sería completa, como es el caso de las cuencas Delfín superior e

inferior ubicadas al SW del área de estudio en donde las fallas normales de estas cuencas son perpendiculares a la falla transforme Ballenas.

### **VI. 3 Horizontes sismoestratigráficos**

La configuración de horizontes sismoestratigráficos permitió determinar las zonas de alta sedimentación. Los mapas configurados muestran que el área de mayor depositación en la zona de estudio se ubica a lo largo de la Cuenca Wagner. Posiblemente el flujo de estos sedimentos provenientes del Río Colorado fue siguiendo el trazo de la falla Cerro Prieto, esto es evidenciado por la tendencia y valores máximos de las isócronas a lo largo de esta falla (Figura 38 y 39).

Por otro lado se observó que el paquete de sedimentos en la parte norte de la cuenca Wagner es más grueso y se encuentran basculados hacia la falla Consag; lo que puede ser indicativo que esta falla sea más activa, lo cual se evidencia por la actividad sísmica que es mayor hacia el extremo norte de esta falla con respecto a la falla Wagner (Figura 41).

## VII. CONCLUSIONES

Se generó una base de datos del alto Golfo de California que contiene información de las secciones sísmicas, cada una de las secciones muestran el detalle estructural y sismoestratigráfico de la Cuenca Wagner y sus alrededores.

Un rasgo característico en todas las imágenes sísmicas es la gran cantidad de fallas. En su mayoría son de tipo normal habiendo en promedio 1 falla por km. Se caracterizan por un marcado paralelismo entre ellas, en su mayoría con ángulos de echado mayores a los 45° y generalmente afectan sólo las secuencias sedimentarias, ya que no penetran al basamento ni muestran alguna tendencia de que afloran en el piso oceánico. Muchas de estas no fue posible correlacionarlas en las secciones sísmicas vecinas.

La forma geométrica de la Cuenca Wagner definida por la intersección de las fallas Consag y Wagner con la falla Cerro Prieto indican que esta cuenca es de tipo pull apart inmadura. Posiblemente las fallas Wagner y Consag adquieran una posición perpendicular a la falla Cerro Prieto permitiendo una extensión completa.

EL basamento acústico es interpretado al oriente de la falla Cerro Prieto y el flanco derecho de la Falla Wagner. También se presenta en la región más al suroeste de la zona de estudio, cerca de las costas de Baja California. Sin embargo en el depocentro de la Cuenca Wagner no se observa indicio alguno, por lo que pensamos que pudiera estar a una profundidad mayor a 7 km.

Se observo la presencia de un depocentro llamado informalmente El Chinero que se ubica al occidente de la Cuenca Wagner; tiene una profundidad de  $\sim 4.5$  km

El procesado de datos puede ser mejorado afinando los parámetros utilizados durante el proceso, por ejemplo en el análisis de velocidad; esto permitirá obtener mejores secciones sísmicas.

## VII. LITERATURA CITADA

Alles, L.D. 2006. The Delta of the Colorado River. En: David L. Alles (ed.). The Delta of the Colorado River. Western Washington University. 1-26 p.

Álvarez, L.G., F. Suárez-Vidal, R. Mendoza y M. González-Escobar. 2007. Correlation between bathymetry and Geologically active structures of the upper Gulf of California. Submitted to Sedimentology.

Angelier, J., B. Colletta, J. Chorowicz, L. Ortlieb y C. Rangin. 1981. Fault tectonics of the Baja California peninsula and the opening of the Sea of Cortez, Mexico. *J. Struct. Geol.* 3(4): 347-357 p.

Aragón-Arreola, M. 2006. Structural evolution of basins in the Northern and Central Gulf of California. Implications for rift kinematics and strain accommodation. Tesis de Doctorado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, B.C., 146 pp.

Aragón-Arreola, M., y A. Martín-Barajas. 2007. Westward migration of extension in the northern Gulf of California, México. *Geology*. En prensa.

Beach, A., y Trayner, P. 1991. The geometry of normal faults in a sector of the offshore Nile Delta, Egypt. En : Roberts, A. M., Yielding, G., Freeman, B. (Eds.). *The Geometry of Normal Faults*, Special Publication. Geological Society of London. 56: 172-182 p.

Castro, R. R., O. Mendez, A. Perez-Vertti, A. Mendoza, L. Inzunza. 2007. Seismicity in the Gulf of California Region Recorded by the NARS-Baja Array: Preliminary Results. American Geophysical Union (AGU) Joint Assembly, Acapulco, México, 22-25th May 2007.

Coleman, I. M. y L. D. Wright. 1975. Modern River Deltas: Variability of Processes and Sand Bodies. In Broussard, M.L. (ed.) *Deltas: Models for Exploration*, 99-149 p.

Colleta, B., y L. Ortlieb. 1984. Deformation of middle and late pleistocene deltaic deposits at mouth of the Rio Colorado, Northwestern Gulf of California. En: Mapilca Cruz, V., Celis Gutierrez, S., Guerrero García, J & Ortlieb, L. (eds). *Neotectonics and sea level variations in the Gulf of California area, a symposium*, Hermosillo, Sonora, México, Abril 21-23. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 20 p.

- Couch, R.W., G.E. Ness, O. Sanchez-Zamora, G. Calderón-Riveroll, P. Doguin, V. Plaswman, S. Coperude, B. Huehn y W. Gumma. 1991. En: J. P. Dauphin and B. R. T. Simoneit, The Gulf and Peninsular Provinces of the California. Gravity Anomalies and Cristal Struture of the Gulf and Peninsular Province of the California, in AAPG. Memoir 47: 25-45 p.
- Cruz-Castillo, C.M. 2002. Catálogo de Fallas Regionales en el Norte de Baja California, México. GEOS, Unión Geofísica Mexicana, A.C. 37-42 p.
- Curry, J.R., D.G. Moore, K. Kelts, y G. Einsele. 1982. Tectonics and geological history of the passive continental margin al the tip of Baja California. Initial reports of the Deep Sea Drilling Project. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C. 64: 1089-1116 p.
- DeMets, C.A., 1995. Reappraisal of seafloor spreading lineations in the Gulf of California: Implications for the transfer of Baja California to the Pacific plate and estimates of Pacific-North America motion. Geophysical Research Letters. 22: 3545-3548 p.
- Elders, W.A., R.W. Rex, Meidav, Tsvi, P.T. Robinson y S. Biehler. 1972. Crustal spreading in Southern California. Science. 178: 15-24 p.
- Fenby, S.S y R.G. Gastil. 1991. Geologic-Tectonic Map of the Gula of California and Surrounding Areas. En: The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias, AAPG Bllletin. Memoir 47: 79-83 p.
- Frez, J., y J.J. González. 1991. Crustal Structure and Seismotectonics of Northern Baja. En: Dauphin, J. P. y Simoneit, B. R. T. (eds.). The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias. American Association of Petroleum Geologists. 47: 261-283 p.
- García-Abdeslem, J. 2006. Evolución Tectonoestratigráfica de las Cuencas del Norte del Golfo de California. Volumen 2 – Metodos Potenciales, Reporte técnico No. 410303843, PEMEX. 48 p.
- Gibas, A. D. 1984. Structural evolution of extensional basin margins. *J. Geol.. Soc. London*, Vol. 141, pp. 609-620.
- González-Escobar M., A. Martín-Barajas, J. Abdeslem-García y M. Aragón-Arreola. 2006. Evolución Tectonoestratigráfica de las Cuencas del Norte del Golfo de California, Volumen 2 -Procesamiento e interpretación de datos de sísmica de reflexión. Reporte técnico No. 410303843, PEMEX. 23 p.
- Henry, C.D. y J.J. Aranda-Gómez. 2000, Plate interactions control middlelate Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range. Tectonophysics. 318: 1-26 p.

- Heney, T.L. y J.L. Bischoff. 1973. Tectonic elements of the Norther part of the Gulf of California. Geological Society of America Bulletin. 84: 315-330 p.
- Hurtado-Artunduaga, A.D. 2002. Modelo estructural de la cuenca de Wagner en el Golfo de California basado en sísmica de reflexión multicanal (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. 109 p.
- Jenning, S., y G.R. Thompson. 1986. Diagenesis of Plio-Pleistocene sediments of the Colorado River Delta, southern California. Journal of Sedimentary Petrology. 56: 89-98 p.
- Jaillard, E. 1993. Deltas. Office de recherche scientifique d'outre-mer (ORSTOM), France. 85 p.
- Liner, C.L. 2004. Elements of 3D seismology. Penwell Co. Segunda Edición. Tulsa, Oklahoma, 608 p.
- Lonsdale, P. 1989. Geology and tectonic history of the Gulf of California. En: Winterer, D. y Hussong, M. (eds.). The Eastern Pacific Ocean and Hawaii. The Geology of North America Geological Society of America, Boulder, CO. 499-521 p.
- NASA, 2007. Imagen de satélite tomada con sensor MODIS del Delta del Río Colorado y Baja California (modificada), <http://visibleearth.nasa.gov/>.
- Martín-Barajas, A. 2000. Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 53: 72-83 p.
- Martín-Barajas, A., J. Abdeslem-García, J. Helenes Escamilla, González-Escobar M., M. Aragón-Arreola y M. Pacheco Romero. 2006. Evolución Tectonoestratigráfica de las Cuencas del Norte del Golfo de California. Volumen 1 – Integración de resultados. Reporte técnico No. 410303843, PEMEX. 63 p.
- McQuillin, R., M. Bacon y W. Barclay. 1979. An introduction to seismic interpretation. Gulf Publishing Company. Houston. 199 p.
- Molnar, P. 1988. Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics. Nature. 335: 131-137 p.
- Nagy, E.A., y J.M. Stock. 2000. Structural controls on the continent-ocean transition in the northern Gulf of California. Journal of Geophysical Research. 105(B7): 16,251-16,269 p.

Pacheco-Romero, M. 2004. Estructura y evolución de la Cuenca de Altar, Sonora, a partir de la integración de datos geofísicos y geológicos. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, B.C. 124 p.

Pacheco-Romero, M.F., A. Martín-Barajas, W.A. Elders, J.M. Espinosa-Cardena, J. Helenes y A. Segura. 2006. Stratigraphy and structure of the Altar basin of NW Sonora: Implications for the history of the Colorado River delta and the Salton trough. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 23(1): 1-22 p.

Peacock, D.C.P., Kipe, R.J., y Sanderson, D.J. 200. Glossary of normal faults. *Journal of Structural Geology*. 22: 291-305 p.

Pérez Cruz, G. 1982. Algunos resultados de la Investigación geológico-geofísica en la porción noroccidental del Golfo de California. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Geólogos Petroleros*. 34: 71-77 p.

Peréz-Tinajero, C. 2007. Sísmica de Reflexión en el Desierto de Altar, Sonora México. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. 101 p.

Persaud, P. 2003. Images of Early Continental Breakup in and around the Gulf of California and the Role of Basal Shear in Producing Wide Plate Boundaries. Thesis Doctor of Philosophy, California Institute of Technology. 144 p.

Persaud, P., J.M. Stock, M. Steckler, A. Martin-Barajas, J.B. Diebold, A. Gonzalez-Fernandez y G. Mountain. 2003. Active deformation and shallow structure of the Wagner, Consag and Delfin Basins, Northern Gulf of California, Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 108(7): 2355 p.

Phillips, R. P. 1964. Seismic refraction studies in Gulf of California, in *Marine Geology of the Gulf of California*, T.H. Van Andel and G.G. Shor, Eds, Amer. Assoc. Petrol. Geologists, Tulsa, Oklahoma.

Stock, J.M., y K.V. Hodges. 1989. Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California peninsula to the Pacific plate. *Tectonics*. 8(1): 99-115 p.

Thatcher, W. y J.N. Brune. 1971. Seismic Study of an Oceanic Ridge Earthquake Swarm in the Gulf of California. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 473-489 p.

Winker, C.D. y S.M. Kidwell. 1986. Paleocurrent evidence for lateral displacement of the Pliocene Colorado River Delta by the San Andreas fault system, southeastern California. *Geology*. 14: 788-791 p.

Withjack, O. M., R.W. Schlische y P.E. Olsen, 2002. Rift-Basin structure and its influence on sedimentary systems. Sedimentation in Continental Rifts, SEPM Special Publication No. 73. Society for Sedimentary Geology. 57-81 p.

Yilmaz, O. 1987. Seismic Data Processing. Investigations in Geophysics, Society of Exploration Geophysicists. Segunda Edición. Tulsa, Okla, 526 p.